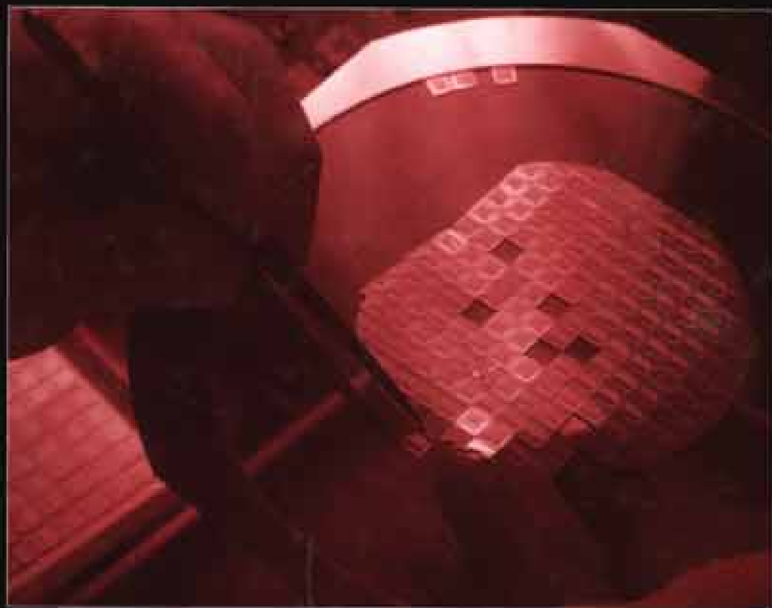
مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية
المنظمة العربية للترجمة

مِلْ شفارتز

# المـواد الجديـدة

## تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها



ترجمة
د. حاتم النجدي

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

# المواد الجديدة

## تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها

**اللجنة العلمية لسلسلة التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة:**

محمد مراياتي

منصور الغامدي

محمد الشيخلي

حسن الشريف

عبد الرحمن العريفي

حاتم النجدي

المنظمة العربية للترجمة

مِلْ شفارتز

# المواد الجديدة

## تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها

ترجمة

د. حاتم النجدي

مراجعة

د. يمن أتاسي

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

**الفهرسة أثناء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة**
شفارتز، مِلْ
المواد الجديدة: تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها/ مِلْ شفارتز؛ ترجمة حاتم النجدي؛ مراجعة يمن أتاسي.
1200 ص. - (تقنيات استراتيجية ومتقدمة - المواد المتقدمة؛ 2)
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-2037-2
1. المواد - بحوث. 2. الطاقة - تحويل. أ. العنوان. ب. النجدي، حاتم (مترجم). ج. أتاسي، يمن (مراجع). د. السلسلة.
620.1

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

Schwartz, Mel
*New Materials: Processes, and Methods Technology*
© All Rights Reserved. Authorized Translation from English Language Edition Published by CRC Press, Part of Taylor & Francis Group LLC.

© **جميع حقوق الترجمة العربية والنشر محفوظة حصراً لـ:**



**المنظمة العربية للترجمة**

بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 - 113
الحمراء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 - 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

---

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 - 113
الحمراء - بيروت 2407 2034 - لبنان
تلفون: 750084 - 750085 - 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» - بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

---

**الطبعة الأولى**: بيروت، كانون الثاني (يناير) 2011

# المحتويات

# تقديم

## سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة ضمن مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني. ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم ومنها:

**أولاً**: البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ - 2007 م الذي يؤكد على ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يأتي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

**ثانياً**: «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق عنها اعتماد إحدى عشرة تقنية استراتيجية هي: المياه، والنفط، والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر (النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات، والاتصالات، والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

**ثالثاً**: مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تفعل أيضاً ما جاء في «أولاً» عن حضور اللغة العربية في الإنترنت حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة الكتب المهمة، وبخاصة العلمية، ما يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كل من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون الأول مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون الثاني كتاباً جامعياً، والثالث كتاباً عاماً موجهاً إلى عامة المهتمين، وقد يغطي كتاب واحد أو أكثر ذلك مجتمعاً. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثين كتاباً مترجماً، كما خصص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

وقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير منها أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي أُلّف بها الكتاب وليست مترجمة عن لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصب في جهود نقل التقنية والابتكار ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على إنجازها في المنظمة، وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

**الرياض 20/ 3/ 1431 هـ**
**رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية**
**د. محمد بن إبراهيم السويل**

# تمهيد

إن أحد أهم متطلبات تطوير وتصنيع منتَجات مُرضِية بتكلفة دُنيا هو القيام بالاختيار الاقتصادي السليم للمواد الهندسية. وهذه ليست مهمة سهلة، لأنها ممتلئة بالارتياب. فغالباً ما يكون هناك افتقار إلى الحقائق التي يجب الاعتماد عليها، إضافة إلى أن ثمة عدداً هائلاً من المواد التي يجب البحث ضمنها عن المواد الفضلى لأداء المهمة.

لذا فإن العثور على المواد المثلى لتطبيقٍ ما، يتطلب نهجاً هندسياً مُحكَماً. لم يحصل الاختيار الجدِّي للمواد ومكاملتها ضمن منهجية التطوير والتصنيع الهندسية إلا في العقدين السابقين. قبلها، كان اختيار المواد يحصل اعتباطياً إلى حد ما. وقد كان الإجراء العام هو الاعتماد كلياً على الخبرة السابقة تقريباً، وجعْل تصميم المنتَج متوافقاً مع خصائص المواد القليلة التي يعرفها المهندس. وغالباً ما كان برنامج تطوير المنتَج يكتمل قبل البدء بإيلاء المواد أي اهتمام. في تلك الظروف، كان تغيير المواد يحصل تدريجياً، وكان كل تغيير يحقِّق تحسينات قليلة فقط.

لكن في السنوات الأخيرة، وضع التزايد الهائل في تنوُّع المواد، المترافق مع نشوء متطلبات جديدة أشد صرامة لخدمات أقل تكلفة، حداً لهذا النهج الاعتباطي. واليوم، أصبح انتقاء المواد سيرورة معقدة تعمل ضمن دورة تطوير المنتَج ذاتها، وينغمس فيها عدد من التقنيين والأقسام المتخصّصة. وجرى تطوير إجراءات تحليلية

للتعامل مع التداخل المعقد بين المتطلبات ومواصفات الأداء. وغدت أقسام هندسة المواد، والمختصون فيها الذين يكرِّسون وقتهم الكامل لمسألة انتقاء المواد، أجزاء مهمة من أقسام الهندسة والتصنيع.

إن انتقاء المواد ليس مهمة سهلة تُؤدَّى في مكان محدد ووقت معين من تاريخ المنتَج. فمكان وزمان القيام به يعتمدان على العديد من العوامل. لكنْ، وبرغم أن لكل قرار انتقاء للمواد مبرراته وسلسلة أحداثه الخاصة به، فإن ثمة نهجاً عاماً مشتَركاً في سيرورة الانتقاء تلك.

تعمل سيرورة انتقاء المواد في مجالين متمايزين من أنشطة الهندسة والتصنيع، فهي **أولاً** تمثِّل جزءاً أساسياً من مشاريع تطوير المنتجات الجديدة، **وثانياً**، تؤدّي دوراً مهماً في مراجعة وإعادة تقييم المنتجات القائمة. في الحالة الأولى، يكون انتقاء المواد معتمداً على طبيعة منتجات معيّنة، ولذا يكون ذا صفة موجّهة أو محدّدة. أما في الحالة الثانية، فلا يكون بالضرورة مرتبطاً بمنتَج محدّد، ولذا تكون له غالباً صفة أقل رسمية، وما يمكن تسميته، غير موجّهة. إن كلتا مهمتَي سيرورة انتقاء المواد على القدر نفسه من الأهمية.

يشتمل هذا الكتاب على كثير من المواد المطوَّرة حديثاً، إضافة إلى السيرورات التي ظهرت في العقد السابق. لقد بدأ **عصر المواد**، وسيبقى معنا مدة طويلة في المستقبل. إنه عصر تتَّصف فيه المواد المتاحة بأنها غير محدودة العدد والتنوُّع. إنه عصر تُعدُّ فيها تشابهات المواد في المستوى المجهريّ أشدّ أهمية من اختلافاتها في المستوى الجهريّ. إنه عصر تعتمد فيه الآليات المتقدمة اعتماداً أساسياً على المواد. يضاف إلى ذلك أنه عصر تَعِد فيه المواد والسيرورات التي سوف تظهر بفتوحات لا تُصدَّق في تجهيزات الأتمتة والتصغير والاتصالات واستقصاء الفضاء والاستخدام الأمثل للطاقة. «إن الهندسة والتقانة تقعان في صميم المادة»، وفق ما قاله روبرت وايت (Robert M. White)، المدير الأسبق لأكاديمية الهندسة الوطنية

الأميركية، عن الكيفية التي يمكن بها للولايات المتحدة الأميركية الازدهار في إطار الاقتصاد العالمي (عدد الذكرى السنوية الخامسة والعشرين للمجلة (*The Bridge*)). إن عصر المواد هو عصر من صنع الإنسان. وهو عصر يتطلب أناساً قادرين على استيعاب واستخدام علم المواد الجديد، أناساً بعيدي النظر بقدر يكفي لتحطيم الحواجز الشائعة بين الاختصاصات الهندسية المختلفة. إنه عصر يقتضي منا إعادة النظر في طرائق عملنا. ففي التعليم، أثار أسئلة عن الطرائق المثلى لتعليم المواد للمهندسين. وفي البحث والتطوير، أثار أسئلة عن أكفأ طرائق تخطيط وإدارة البرامج الكبيرة التي تموِّلها الحكومة. وفي الصناعة، أثار أسئلة عن أفضل طرائق التعامل مع مشاكل المواد. وفي المجتمعات التقانية، أثار أسئلة عن أغراض البرامج التقنية وعن ضرورة إعادة النظر فيها، مؤدّياً إلى مجتمعات جديدة كلياً. وفي حقل المعلومات، أدّى إلى نشوء مشاكل كبيرة في جمع بيانات المواد وتقييمها ونشرها.

إن تقدمنا في التحليق الفضائي والأتمتة والإلكترونيات والطاقة الذرّية يعتمد على حل مشاكل جوهرية تخصّ المواد. وفي حقل المنتجات الصناعية والاستهلاكية التي هي أقل أهمية، يُنظر إلى المواد على أنها أهم العوامل التي تحدِّد التكلفة والجودة وحسن الأداء. لقد لخَّص الدكتور بايكر (Dr. W. O. Baker)، نائب الرئيس الأسبق للبحوث في مختبرات بل، أهمية المواد في عصرنا الحالي بالتالي: «خلافاً لكل ما مضى، يجب أن تكون المواد هي الوسيلة التي يحقق بها الإنسان أحلامه بالازدهار على الأرض، أو إنْ أخفق في ذلك، أن تكون تلك التي تمكِّنه من التحرر والانطلاق في الفضاء».

لم يتزايد عدد المواد فحسب، بل تزايدت تراكيبها أيضاً،

فالمعادن المطلية واللَّدائن المقوَّاة والصفائح والمواد المركَّبة والمواد المركَّبة ذات البنية السداسية (بنية خلية النحل) والبنى النانوية والمساحيق والطلاءات المتعدّدة الطبقات (بتوضيع الأبخرة كيميائياً، وتوضيع الأبخرة فيزيائياً، والليزر) والمواد المتدرِّجة وظيفياً والبلّورات الأحادية وخلايا الوقود والمواد الكهروضغطية، إضافة إلى مفهوم النُظُم، أصبحت جميعاً بين يدي مستخدم المواد. وأصبح بإمكاننا الآن تركيب مواد يُستفاد فيها من الخصائص المثلى لمكوِّنَين أو أكثر.

إن التزايد الهائل في عدد المواد المترافق بمتطلبات خدمات جديدة أشد صرامة يُدخل كثيراً من التغيّرات في طرائق استخدامنا للمواد. في الماضي، كانت وجهة نظر مستخدم المواد هي جعل التصميم أو المنتَج موافقاً لخصائص المواد. لكن هذا النهج قد تغيَّر، فالاهتمام الرئيس الآن هو إيجاد واستخدام مادة أو مجموعة مواد تتصف بجملة من الخصائص التي تحقق شروط التصميم والخدمة. لذا فإن النهج الجديد موجَّه إلى أغراض الاستخدام النهائية. والخطوة المنطقية التالية طبعاً هي المواد المفصَّلة للتطبيق. وفقاً لما سوف نراه في هذا الكتاب، فقد تحقَّق تقدم محدَّد في هذا الاتجاه، وسوف يتحقَّق المزيد في المستقبل.

لم يعُد العلماء والباحثون والتقانيون يقبلون بالترتيبات الذرّية التي أعطتنا إياها الطبيعة والمتمثلة بالبوليمرات المتقدّمة، أي بتجمُّعات الجُزَيئات العملاقة المشابهة للسلسلة. لقد استُخدمت البوليمرات المتقدمة التي أعطتنا إياها الطبيعة، ومنها الخشب والجلد والغراء، بوصفها مواد هندسية طوال قرون، ولم نحصل على فهم كافٍ لبنيتها الجُزَيئية يمكّن من الحصول على ما هو أفضل منها إلا

في العقدين السابقين. لكن اليوم، بتغيير طول سلسلة الجُزَيء ودرجة تشعّبها أو تشبيكها، يمكن إنتاج مواد ذات مجموعات من الخصائص التي تحقِّق متطلبات تطبيقات محدَّدة.

في كثير من المواد والسيرورات المذكورة يوجد نهج الحالة الصلبة. يظهر مفعول علم الحالة الصلبة في المواد الهندسية عند ثلاثة مستويات مختلفة. فقد مكَّن هذا العلم من:

**1** ـ اكتشاف مواد جديدة كلياً، منها ما قد يكون استثنائياً.

**2** ـ إدخال تحسينات كبيرة أو صغيرة في المواد الموجودة لا تتأتى إلا من خلال الفهم التام لطبيعة المواد وخصائصها.

**3** ـ فهم الحدود النظرية النهائية لخصائص المواد قبل تحقيقها عملياً.

أخيراً، فإن معظم المواد المألوفة المستخدمة اليوم كانت قد طُوِّرت عبر القرون من خلال المهارات المحضة، ولم تكن الجهود الأولى في علم الحالة الصلبة موجَّهة إلا إلى محاولة التعليل المنطقي، من خلال المفاهيم النظرية الحديثة، للحقائق والخصائص التي كانت معروفة تماماً للتقانيين والمهندسين.

إن كثيراً من التطوُّرات المهمة في مجالات المعادن الجديدة وأنصاف النواقل والمواد المغنطيسية والعوازل الكهربائية والسيراميك كان نتيجة طرائق التجربة والخطأ، أي الطرائق «الإحصائية» التي كانت متّبعة في الأبحاث، مع استفادة قليلة من علم الحالة الصلبة المطَّرد التقدُّم.

من ناحية أخرى، يجب تأكيد أن علوم الحالة الصلبة لم تَدفع

إلى الأمام علوم المواد المختلفة فحسب، بل إن كثيراً من التطورات الجوهرية المهمة في الحالة الصلبة كانت أيضاً في عداد المستحيل لولا مساعدة تقانة المواد المتسارعة التطور، القائمة على الأسس العلمية في معظم الأحيان، لعلمي الترموديناميك والكيمياء اللاعضوية المعروفَين. إن تحضير المواد الفائقة النقاء، والإضافة المتحكَّم فيها للشوائب المنخفضة التركيز، وتنمية البنى الأحادية البلورة المثالية تقريباً، كانت من بين التقنيات التي لا غنى عنها في تحقيق التقدُّم.

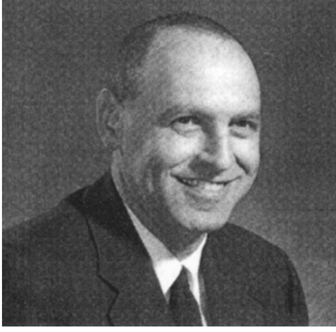
والدرس المُستَقى من مجموعة المواد الجديدة هذه هو أن المهندسين اعتمدوا طوال سنين كثيرة على مواد قديمة متوافرة، كالفولاذ، في تصميم الهياكل، أو على خلائط الحديد والسليكون في التصاميم المغنطيسية. أما العناصر المعدنية النادرة أو الصعبة العثور عليها، فقد بقيت فضولاً علمياً. أما الآن، فقد ظهر على نحو مفاجئ عدد كبير من المواد الجديدة بتراكيب كثيرة جداً تحقِّق جميع الإمكانات بمجرد التجربة والخطأ التي مثَّلت سبيل التقدُّم المثمر في الماضي. وسوف يبقى نهج التجربة والخطأ الحكَم النهائي دائماً، إلا أن ثمة حاجة إلى مبادئ أساسية تقودنا إلى ما يمكن تجريبه، وإلى كيفية التقدُّم من نجاح أوّلي نحو المزيد من التحسينات.

وفي الطرف الثاني من مجال المواد المقابل للمعادن، هناك مواد يرغب الفيزيائي بتجاهلها، وهذا ما لا يستطيع المهندس فعله، وهي المواد التركيبية المعقّدة والمواد العضوية. إن من الصعب توقّع أنماط التقدُّم في هذين المجالين أو تعميمها. مع ذلك سوف تحتوي عدة فصول من الكتاب على مناقشة لهذه المواد التركيبية. إن المشكلات في مجال هذه المواد الشديدة التعقيد صعبة جداً، وهي تحتاج إلى جميع موارد التقنيات الحديثة لحلّها ولإنتاج تلك المواد.

لقد ترك علم الحالة الصلبة بصمته، وسوف يتركها، على بعض

الحقول المذكورة آنفاً. وفوق ذلك، لا يُبدي هذا العلم الأساسي أي مؤشِّر إلى نضوبه من الحوافز لحصول اكتشافات جديدة فيه. وإذا كان ثمة تحدٍّ في السنوات القادمة، فهو أن على المهندسين أن يغيِّروا من طرائق تأهيلهم وممارساتهم لإفساح مزيد من المجال لنهج الفيزيائيين في حل طيف مشكلات المواد اللامتناهي عملياً.

## المؤلف



حصل مِلْ شفارتز (Mel Schwartz) على إجازتين، في علم المعادن وإدارة الهندسة، ودرس القانون وهندسة المعادن والتربية. وتمتد خبرته المهنية على مدى 51 عاماً، حيث عمل خبير معادن لدى مكتب المناجم الأميركي، وخبير معادن ومهندس إنتاج لدى شركة U. S. Chemical Corps، ومدير التصنيع التقني لدى مختبرات البحث والتطوير وهندسة التصنيع، وكبير المهندسين لدى شركة Martin-Marietta Corporation مدة 16 سنة، ومدير برنامج، ومدير التصنيع لمصلحة مختبرات البحث والتطوير، وكبير باحثي المعادن لدى شركة Rohr Corp مدة 8 سنوات، ومهندساً وخبير مواصفات المعادن وعمليات التعدين، ومديراً لتقانة التصنيع لدى شركة Sikorsky Aircraft مدة 21 سنة. وحينما تقاعد عمل مستشاراً لكثير من الشركات منها Intel وFoster Wheeler. وهو الآن محرِّر مجلة (*Journal of Advanced Materials*) التي تُصدرها جمعية تطوير المواد وهندسة السيرورة الأميركية (Society for the Advancement of Material and Process Engineering) (SAMPE).

حصل مِلْ على العديد من الجوائز وشهادات التقدير منها: جوائز اختراع وجائزة أفضل مخترع في السنة من شركة Martin-Marietta، وجائزة C. Adams وجائزة Lecture and R. D. Thomas Memorial من جمعية اللحام الأميركية. وهو أول من حصل على جائزة G. Lubin، وهو زميل منتخب لدى SAMPE، وزميل منتخب ومهندس العام لدى جمعية المواد الأميركية. وحصل على جائزة Jud Hall من موسوعة المواد الذكية (*Smart Materials Encyclopedia*) (SME).

ومن أنشطة مل المهنية تعيينه عضواً في لجان تقنية في جمعية المواد الأميركية (كتُب تقنية عن المواد المركَّبة ووصلها)، وعضواً في لجنة مراجعة المخطوطات لدى مجلة (*Journal of Metals Engineering*)، ولدى معهد المعادن (Metals Institute) ولدى مجلة (*Welding Journal*) بوصفه مراجعاً مختصاً، ورئيس اللجنة I (لجنة اللأْم والسيرورات المرتبطة بها في المعهد الدولي للحام) طوال 20 سنة، واللجنة IV (لجنة الحزمة الإلكترونية والليزر والسيرورات المتخصصة الأخرى) طوال 18 سنة.

وكان مل نشطاً في مجال الاختراع، وقد سجل خمس براءات اختراع، أهمها اللأْم السريع للألمنيوم التي بيعت تحت الاسم التجاري Alumibraze.

وألَّف مِلْ 16 كتاباً وأكثر من 100 مقالة تقنية. وهو مشهور عالمياً بوصفه محاضراً عمل في أوروبا وكندا والشرق الأقصى، إضافة إلى كونه محاضراً لدى جامعات ومعاهد أميركية.

# جدول الرموز

**اعتُمدت في الترجمة الرموز الآتية:**

| | | |
|---|---|---|
| م | : متر | (m) |
| سم | : سنتيمتر | (cm) |
| مم | : ميليمتر | (mm) |
| ميكرون | : ميكرومتر | (µm) |
| نم | : نانومتر | (nm) |
| غ | : غرام | (g) |
| كغ | : كيلو غرام | (kg) |
| مْ | : درجة مئوية (سلزيوس) | (˚C) |
| فْ | : درجة فهرنهايت | (˚F) |
| ك | : كلفن | (K) |
| سا | : ساعة | (h) |
| ثا | : ثانية | (s) |
| ٪ذ | : نسبة عدد الذرّات المئوية | (Atom %) |

٪ح : نسبة مئوية حجمية (V%)

٪و : نسبة مئوية وزنية (Wc %)

٪م : نسبة مئوية مولية (Mol%)

تُرّ : 133 باسكال (Tor: 133 Pa)

# 1

## مـقـدمـة

ما هي أنواع التقانات التي سوف تُناقَش أو تُطوَّر أو تُنضَّج أو تصبح موضع اهتمام بعد 5 أو 10 أو 20 سنة من الآن؟

أولى تلك التقانات هي تلك التي تغذي ثورة المعلومات والاتصالات الجديدة، ومنها تلك التقانات الرائدة في صناعة أنصاف النواقل القائمة على متمم الأُكسيد المعدني سيموس (Complementary Metal Oxide Semiconductor) (CMOS) المنخفضة استهلاك الطاقة، والدارات المتكاملة، والرقاقات القائمة على السليكون والجرمانيوم، وفي التطويرات التي تجعل الدارات المتكاملة الميكرويّة أصغر وأرخص وأكثر كفاءة.

والتقانتان الأخرتان اللتان تتصفان بأهمية كبرى هما المواد الفائقة (Super materials) ومصادر الطاقة الصغيرة الحجم والمديدة العمر. وسوف تُصمَّم الحواسيب وتصنَّع مواد جديدة في المستوى الجُزَيئي تُستخدم كثيراً في صناعات النقل والحواسيب والطاقة والاتصالات. وسوف نرى أيضاً استخداماً واسعاً لخلايا الطاقة (Fuel cells) والمدّخرات في التجهيزات الإلكترونية المحمولة.

لقد كانت ثمة إنجازات وتطورات تقنية كبيرة في مجال المواد والمعالجة خلال العقد الماضي، منها:

تطوير سلسلة من المواد المتعدّدة المعادن (Intermetallic) المتقدمة المقاومة للحرارة ذات مقاومة تآكُل أعلى مقارنة بالمواد الشائعة. وهذه المواد الجديدة تُبدي انخفاضاً ملحوظاً في معدّلات الاهتراء الناجم عن الأكسدة، وتتصف بنقطة انصهار أعلى كثيراً من تلك المعروفة للمواد المعهودة، مع احتفاظها بخصائص المقاومة والزحف التي تتصف بها المواد المعهودة. يضاف إلى ذلك وجود تطبيقات لها في مجاري عوادم محرّكات الطائرات ومكوّناتها.

● طريقة محسَّنة لانبثاق الخلائط المعدنية ومتعدّدات المعادن العالية الحرارة التي تنطوي على إمكان الإنتاج المنخفض التكلفة، وعلى زيادة إنتاجية المواد بمقدار يصل حتى 40 في المئة.

● طريقة جديدة لتطبيق سيرورة الصُهارة الحارة لإنتاج صفائح من مادة فينولية مسبقة التشريب تُستخدم في إنتاج مكوّنات المواد المركَّبة كربون ـ كربون أو كربون ـ فينول. إن سيرورة الصُهارة الحارة هذه سوف تقلِّل استخدام الكيماويات الخطيرة الناتجة من سيرورة إنتاج المواد المركبة بنسبة 75 في المئة مع تخفيض تكلفة مواد التقوية الأولية وتحسين مواصفات المواد.

● المعالجة الذكية التي أصبحت حافزاً لتحسين المعالجة، والتي تعِد بسيرورات متحكَّم بها من خلال المُحِسَّات (Sensors) ونُظُم التحكم التي تستخدم الذكاء الصناعي والشبكات العصبونية والمنطق الترجيحي.

● تصنيع المواد المركَّبة، وهو سيرورة لتحويل المواد تتأثر كل خطوة فيها بقرارات اتُّخِذت ومسارات اختيرت سابقاً، وتلك الخطوات تؤثّر بدورها في قرارات وخيارات خطوات السيرورة اللاحقة.

• الهندسة المتزامنة التي تتطلب اتخاذ القرارات أبكر ما يمكن، وأن يكون اتخاذها قائماً على الطبيعة المترابطة للمواد (الراتنجات والمعادن والسيراميك والمقويات والمالئات)، وعلى ترتيبها (التوجيه والبنيان والشكل)، وعلى مسارات المعالجة.

تُعدُّ قولبة الراتنج بالنقل والحقن (Resin Transfer Molding) (RTM) مثالاً جيداً لاستخدام الهندسة المتزامنة على أفضل وجه، حيث يجب تصميم خامة التشكيل وفي الذهن، ليس الجوانب البنيوية فحسب، بل الجوانب الخاصة بسكب الراتنج وتدفقه أيضاً. ويجب أن تصمَّم الأداة، ليس من أجل مواصفات معينة للمنتَج النهائي فقط، بل من أجل خصوصيات الحقن ومعدّلات الشيّ والتبريد ونزع القالب أيضاً.

ويجب أن يعكس حقن الراتنج التوازن الدقيق بين الملء السريع للقالب وسلامة البنيان، إضافة إلى تأمين الأدوات والجوانب المتعلقة بخامة التشكيل، ومنها ناشرات الحرارة الموضعية عبر المقاطع السميكة، ومعدّلات التدفق التفاضلي عبر خامة التشكيل، وتفاعلية الراتنج. إذا أُخذت جميع هذه العوامل في الحسبان قبل تصميم المنتَج، أمكن تصميم سيرورة قولبة الراتنج بالنقل والحقن لضمان أن يكون المنتَج عالي الجودة مع بقائه اقتصادياً.

وظهرت المواد المتدرّجة وظيفياً (Functionally Gradient Materials) (FGMs) أيضاً، وهي مواد مركَّبة تتغير فيها نسب الأطوار المكوِّنة للقطعة موضع الاهتمام بغية تفصيل الخصائص موضعياً لتحسين أداء تلك القطعة. هنا ثمة اهتمام خاص بالتقنيات الفضائية حيث يُتوقَّع وصول درجة حرارة السطح إلى 2000 درجة مئوية، وبلوغ التدرّج الحراري رتبة مئات الدرجات/ ميليمتر.

ويعتقد علماء آخرون أن استخدام التوضيع الكيميائي للأبخرة (Chemical Vapor Deposition) (CVD) في إنتاج المواد المتدرِّجة وظيفياً، يمكِّن من التعديل التدريجي لخليط مكوِّنات البخار الإفرادية للمادة المتدرّجة وظيفياً، بغرض تحقيق تغيير تدريجيّ في تركيب المادة المترسّبة. وإحدى المحاولات في هذا الاتجاه هي نظام الكربون ـ كربيد السليكون (C-SiC)، حيث الغرض من كربيد السليكون هو حماية البنية الكربونية من الأكسدة. إذا نجحت هذه المحاولة، أمكن لهذا النوع من التغشية أن يسمح باستخدام الكربون مادة في صنع الحرَّاقات، على سبيل المثال. وقد تم تحقيق الشروط التي تقود إلى التوضيع المشترك للكربون وكربيد السليكون.

ليست التطورات المذكورة سوى جزء من ثورة حصلت في تطوُّر المواد. وقد أتت من خلال اكتشاف مواد جديدة، وتطوير تقنيات معالَجة جديدة، وإيجاد طرائق وأدوات قياس جديدة لتحليل المواد.

نتيجة ذلك، أصبح من الممكن عملياً تصنيع المواد المركَّبة والموصلات الفائقة، ومواد ذات خصائص جديدة كلياً لم نكن نحلم بها قبل 30 سنة، من قبيل كرات بَكّي (Bucky Balls)، والبوليمرات الموجَّهة، والأغشية الألماسية، والمركَّبات الفوتونية.

«لقد جعلت التحسينات في توصيف المواد في المستوى الذرِّي هذه الاكتشافات ممكنة، وسوف تستمر بتحفيز تطوّرات جديدة»، هذا ما قاله بِلّ أبلتون (Bill Appleton)، المدير المشارك لعلم الفيزياء والمواد المتقدمة لدى مختبرات أوك ريدج الوطنية في أميركا (Oak Ridge National Laboratory).

إن ضم طرائق التوصيف الذرّية الدقة، إلى إمكانات الحوسبة

الفائقة، يجعل التوقع بالخصائص أكثر سهولة. وبهذه الإمكانات، يمكن تصميم وإنتاج مادة جديدة بخصائص محدّدة سلفاً.

لقد جذبت المواد المتدرّجة وظيفياً، وسوف تستمر بجذب الانتباه في شتى أنحاء العالم، مع ظهور مواد جديدة تُضيف وظائف موضعية مختلفة إلى القطعة بالتغيير المستمر لكثافة توزُّع الأطوار، أو لأشكال البنية، من أحد جانبي المادة إلى الآخر، أو بتغييرها موضعياً لتبديل خصائصها.

ثمة حاجة إلى تطوير مواد مقاومة لدرجات الحرارة العالية جداً بغية تطوير الأنواع المختلفة من المكوِّنات والعربات وغيرها. على سبيل المثال، من أجل إعادة استخدام مكّوك فضائي بأكمله، قد تكون المواد المتدرّجة وظيفياً هي المثلى. وفي حين أن أحد سطحَي المادة يمكن أن يتعرض إلى جو مؤكسد عالي درجة الحرارة (1727 درجة مئوية)، يمكن للسطح الآخر أن يُبرَّد إلى 727 درجة مئوية، أي أن ثمة فارقاً في درجة حرارة المادة يساوي 1000 درجة مئوية. حالياً، لا يمكن استخدام المواد المتاحة في مثل هذه البيئة القاسية. إن المواد المختلفة المكدَّسة معاً سوف تنهار بسبب الإجهاد الحراري الذي يتولد ضمنها. صحيح أن العبارة «مواد متدرّجة وظيفياً» عبارة صغيرة بلا ريب، إلا أنها قد تبيَّن أن التحدُّث عن هذه المواد المستحدثة أسهل كثيراً من إنتاجها.

طوَّر الباحثون نوعاً جديداً من المادة يعتقدون أنها سوف تكون أقوى من المواد المركَّبة المعتادة المقوَّاة بالألياف باستخدام طبقات رقيقة متتالية من مواد حاضنة مع بنى التقوية الشائعة، فالمواد المركَّبة من «حاضنة صفيحية» يمكن أن تحل محل المعادن في مكوّنات هيكل الطائرة والمبادلات الحرارية ومرشحات الهباب، وفي التطبيقات الأخرى التي تحتاج إلى مواد شديدة المقاومة وتتحمل

درجات حرارة عالية، وفق رأي مهندسي المواد. إنهم يقولون إنهم يأملون بأن هذه المواد سوف تستعيض عن ألياف التقوية ذات التكلفة العالية بصفيحات أو جُسيْمات أقل تكلفة. تُستخدم في هذه العملية خامة تشكيل ليفية مصنوعة من طبقات مكدسة من القماش. ويقول الباحث جاك لاكي (W. Jack Lackey): «نسرِّب المادة إلى أن نحصل على طبقة منها حول كل ليف، ثم نسرِّب مادة أخرى، ثم نعود ثانية إلى الأولى. وبذلك نوضِّع ما يصل إلى 50 طبقة». ويوضِّح أن مواد الحاضنة يجب أن تكون متوافقة كيميائياً ومتطابقة تماماً معاً من حيث خصائص التمدّد الحراري[1].

لقد وسَّع الاكتشاف الأخير لطائفة من جُزَيئات الكربون الصلبة الكبيرة والشديدة الاستقرار، المسماة بالفُلَّرينات (Fullerenes)، من نطاق وتنوُّع جُزَيئات الكربون المعروفة، وفتح فصلاً جديداً كلياً عن فيزياء وكيمياء الكربون، مع كثير من التطبيقات المحتملة. يمكن النظر إلى الفُلَّرينات باعتبارها متغايراً رئيساً (Allotrope) آخر للكربون، وهي أول شكل جزيئي مستقر للكربون. لكنها تختلف، في تلك الجوانب، عن المتغايرين الآخرَيْن، أي الغرافيت والألماس، فهما ليسا جُزَيئيين، بل أجسام صلبة لانهائية الشبكة. تُرتَّب الفُلَّرينات عموماً على شكل جيوديزي شبه كروي، لذا أخذت اسمها من اسم مخترع القبة الجيوديزية المهندس المعماري الشهير بَكمينستر فلر (Buckminster Fuller). وقد طُوِّرت هذه الفُلَّرينات لتكون نظام تزويد بأدوية السرطان والإيدز والأمراض أخرى.

ما يأمله العلماء هو أنه سوف يكون من الممكن تحميل هذه البنى الكروية الضئيلة، التي يحتوي كل منها على 60 ذرّة كربون مرتبة في شكل سداسي الوجه على غرار كرة قدم، بأدوية وذرّات مشعة ثم إطلاقها على الخلايا المصابة كالصاروخ الموجَّه.

يقول العالِم الكندي يوري ساغمان (Uri Sagman): «تخيَّل قنبلة ذكية. في المعالجة الكيميائية الدارجة، يكون القصف شاملاً. أما هنا فالأمر يشابه إلقاء قنبلة من ارتفاع 000 60 قدم فتصيب الهدف بدقة»[2].

وبعد أن كانت التقانة النانوية (Nanotechnology) مجرّد خيال علمي، وهي تقانة تجميع المادة بإضافة ذرّة تلو أخرى، غدت الآن سباقاً بين علماء وادي السليكون والمطوّرين الآخرين والباحثين والمستثمرين ومؤسِّسي الشركات الجديدة.

أتت البادئة نانو (Nano) من اللغة اليونانية، وهي تعني واحد من مليار، وهي تصف مقاسات ضئيلة يصعب تخيُّلها. يمكن لمليون فُلَّرينة أو نحو ذلك أن يُحشر في حبة أرُز واحدة. وقد ظهرت جُزَيئات الكربون الصلبة بوصفها واحدة من أكثر الأدوات تنوُّعاً في استخدامها ضمن ذخيرة التقانة النانوية المطَّردة التطوُّر. وثمة ابن عم كيميائي لها ممتطّ يسمَّى أنبوب بَكِّي (Bucky tube) تبيَّن أنه واعد جداً أيضاً. وتسمَّى الفُلَّرينات أيضاً كرات بَكّي. صحيحٌ أن فتوحات الحوسبة باستخدام الدارات الجُزَيئية قد لا تكون متاحة تجارياً قبل مرور عقد آخر من السنين، لكن أولى تجهيزات التزويد بالدواء النانوية دخلت مرحلة التجارب السريرية في عام 2004.

إن كثيراً من خصائص الألماس المنتَج بتوضيع الأبخرة كيميائياً تقارب أو تماثل خصائص الألماس الطبيعي. لقد جرى عرض تصنيع ألياف ألماس صلبة بالتوضيع على أسلاك ونوى سيراميكية مختلفة، وإنتاج ألياف ألماس مجوَّفة بإزالة النوى، وثمة توقُّع معقول لتصنيع ألياف ألماسية منافسة اقتصادياً في المستقبل. ويُتوقَّع أن تكون قيم مُعامل يونغ (Young's modulus) المحتملة لألياف الألماس المستمرة وغير المستمرة أعلى كثيراً من تلك التي لألياف كربيد السليكون $SiC_f$

التجاري الحالية، مع زيادات موافقة في المتانة. ويمكن أيضاً للألياف الجوفاء أن تمكِّن من استخدام المُحِسَّات في البنى الذكية.

وتوفِّر المواد السيراميكية خصائص مغرية، منها مقاومة الشدّ والاهتراء والأكسدة عند درجات الحرارة العالية. إلا أن المحدِّد الرئيس لاستخدامها في التطبيقات الإنشائية هو متانتها المنخفضة إزاء الكسر المتأصلة فيها. من الطرائق المستخدمة حالياً لتحسين متانة السيراميك تضمينه شعيرات وألياف تقوية، وتضمين تصنيعه طوراً يخضع لتحويل ضمن حقل الإجهاد المقترن بالصدع، واستخدام تقانة السيراميك والمعدن (مواد مركَّبة من السيراميك والمعدن) التي تمتص فيها المكوّناتُ المعدنية المتينة الطاقة. وتُعزى المتانة المحسَّنة هنا إلى آليات مختلفة منها تشعُّب التَصدُّع، والإجهادات المتبقية المتحرِّضة بالتحويل، وجَسْر الصدوع، وامتصاص الطاقة بالتدفّق اللّدن.

وثمة نهج ممكن آخر لتحسين متانة السيراميك يتحقَّق بالبناء الصفيحي. يُستخدم هذا النوع من البناء بنجاح لتصنيع مواد الحاضنة البوليمرية المركَّبة (Polymeric matrix composites) إلا أنه لم يكن هناك سوى قليل من الاهتمام بتطوير المواد المركَّبة الصفيحية السيراميكية أو السيراميكية المعدنية، برغم أن لهذه الفئة من المواد إمكانات ممتازة للاستخدام في التطبيقات الإنشائية. ثمة تقنيات تغشية معقّدة لإنتاج بنى صفيحية ميكرويّة للسيراميك والمعادن، إلا أن تكلفة إنتاج مادة مركَّبة ضخمة الصفائح ذات حجم مفيد بتلك التقنيات عالية جداً. يوفِّر تصنيع المواد المركَّبة الميكرويّة التسريب الكبيرة الصفائح (Microinfiltrated Macrolaminated Composites) (MIMLC) نهجاً مجدياً اقتصادياً لإنتاج مواد مركَّبة ضخمة الصفائح سيراميكية معدنية.

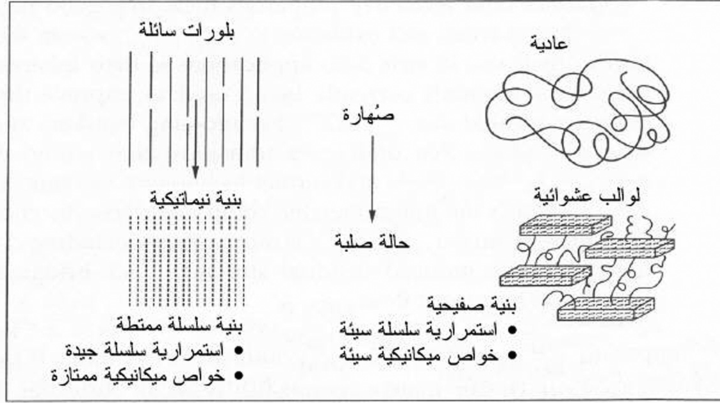
وتتميَّز بوليمرات البلّورات السائلة (LCPs) (Liquid Crystal

(Polymers) عن اللدائن الأخرى ببنيتها الميكرويّة القضيبية الشكل في أثناء طور الانصهار. ففي الراتنجات الأخرى، تكون الجُزَيئات متوجهة عشوائياً في طور الانصهار، لكن عندما تنصهر بوليمرات البلّورات السائلة، فإن جُزَيئاتها الطويلة الصلبة يمكن أن تصطف في تشكيلة شديدة الانتظام تؤدّي إلى عدد من السمات الفريدة.

من تلك السمات انخفاض حرارة التبَلوُر، والانسياب الشديد، ومقاومة صُهارة ملحوظة. إن لهذه البنية الجُزَيئية تأثيراً عميقاً في خواص المادة وخصائص معالجتها يجعل من الأفضل معالجة بوليمرات البلّورات السائلة باعتبارها فئة بوليمرات مستقلة عن الراتنجات غير المتبلورة وشبه المتبلورة. مع ذلك، وبرغم خواص بوليمرات البلّورات السائلة الفريدة، فإنها يمكن أن تُعالج بجميع تقنيات تشكيل الّلدائن الحرارية المعهودة. فمثلاً، يمكنها أن تتدفق بسهولة في القوالب ذات الأجزاء الرقيقة جداً أو الشديدة التعقيد، وأن تقلّل مدة دورة القولبة، وأن تُنتج قطعاً بقليل من إجهاد القولبة، وأن تلغي عملية تشذيب تلك القطع وخطوات الإنهاء الثانوية الأخرى، وأن تخفّض إمكان انكسارها في أثناء التجميع. إن هذه المزايا يمكن أن ترفع معدل الإنتاجية بنحو 3 في المئة أو أكثر، أي بأكثر من زيادة التكلفة الناجمة عن سعر الراتنج العالي.

وتنتظم بوليمرات البلّورات السائلة (تتبلور) في كلا الطورين، الصلب والسائل (انظر الشكل 1 ـ 1). ويتصف هذا الانتظام بأنه نيماتيك (طولي أو مواز)، وهو ينجم عن تدفُّق أو تشوُّه الطور السائل في أثناء ملء القالب.

وظهر أول بوليمر بلّورات سائلة تجاري، أو ليف الكيفلار (Kevlar Fiber)، في عام 1965. وفي عام 1985، أصبحت راتنجات فكترا (Vectra) العالية الجودة متوافرة تجارياً، وظهر كسيدار (Xydar) في عام 1984[3].




**الشكل 1 ـ 1: البلّورات السائلة والبنية البوليمرية العادية**[3].

والشبكات المتداخلة (Interpenetrating Networks) من المصطلحات الشائعة اليوم بين كيميائيي البوليمرات، وسوف تبقى شائعة في المستقبل.

تُشكَّل بوليمرات الشبكة العادية عادة بتشبيك بوليمر متجانس خطي بآخر باستخدام تقنيات التطعيم. أما الشبكات المتداخلة فتتكوَّن من بوليمرين متشابكين أو أكثر من دون روابط تشاركية بينها. وهي غالباً ما تكون بوليمرات غير متوافقة على شكل شبكة. لكن واحداً منها على الأقل يتبلمر أو يتشابك بوجود البوليمر الآخر، وتكون النتيجة تداخل السلاسل في ما بينها.

إن الشبكات المتداخلة هي منظومات غير متجانسة تتألف من طور مطاطي وطور زجاجي. وينجم عن هذا التركيب تضافر الخواص الميكانيكية الذي يؤدي إما إلى مقاومة صدم شديدة أو إلى تقوية، وكلاهما يعتمد على استمرارية الطور. واعتماداً على التركيب، يمكن أن تتحسَّن الخواص الحرارية أيضاً.

لقد جرى تحديد أربعة أنواع من الشبكات المتداخلة حتى الآن:

- الشبكات المتداخلة التسلسلية: تبتدئ هذه الشبكات ببوليمر واحد متشابك فعلاً. ثمّ تنتفخ ضمن مونومر آخر، وتضاف بادئات ومشبِّكات حتى يتبلمر النظام.

- الشبكات المتداخلة المتزامنة: تتشكَّل هذه من مزيج متجانس من المونومرات والبوليمرات الأولية، مع بوليمرات خطية وبادئات ومشبِّكات. وتحصل البلمرة بتفاعلات مصمَّمة مستقلة غير متداخلة.

- شبه الشبكات المتداخلة: تُصنع أشباه الشبكات هذه من بوليمر خطي وبوليمر متشابك.

- الشبكات المتداخلة المتجانسة: تُحضَّر هذه الشبكات من بوليمرات من طائفة واحدة لكنها تحتفظ بخصائص معينة في التبلمر المتداخل.

سوف تُستخدم الآلات المهندَسة نانوياً في تطبيقات التصنيع والتحكم الصناعي.

جرى تطوير آلات ميكرويّة متزايدة الإمكانات من قبل مخابر سانديا الوطنية في أميركا (Sandia National Laboratories) خلال السنتين الماضيتين، وأضيف إليها ذكاء الآن. تستطيع الآلة الميكرويّة الذكية أن تطلب مزيداً من الطاقة، وأن تُعلِم بأنها تعمل بسرعة أو ببطء، وحتى أن تؤدّي مهمات على أساس مؤتمت.

لقد أنتج الباحثون هذا النوع من الآلات الميكرويّة، التي تتألف من محرّكات ضئيلة مجمَّعة مع «أدمغة» من دارات متكاملة ضمن رقاقة سليكونية، بكميات كبيرة للتطبيقات العامة. إن التصميم المتراصّ يمكِّن من تصنيع منظومات كهروميكانيكية ميكرويّة كاملة

على رقاقة واحدة، ومن أمثلتها مقاييس التسارع الخاصة بوسائد هواء الوقاية من الصدمات في السيارات، وأقفال الأسلحة النووية، والجايروسكوبات المستخدمة في التطبيقات المدنية والعسكرية. أما الاستخدامات الطبية فتتضمن تجهيزات صغيرة للتزويد بالدواء.

تتألف سيرورة تصنيع الآلات الميكرويّة من حفر أخاديد صغيرة على رقاقات سليكونية، وتصنيع آلات ضمن هذه الأخاديد. ثم تعالَج الآلات حرارياً وتغطَّس في ثاني أُكسيد السليكون. ويُكوِّن ثاني أُكسيد السليكون المقسَّى سطحاً مستوياً توضَّع عليه الدارات بواسطة الطباعة الضوئية (Photolithography). وتتحرّر المحرّكات الميكرويّة بعد اكتمال بنائها بإزالة ثاني أُكسيد السليكون. يجري تصنيع نظم ميكرويّة عاملة بمعدل نجاح يساوي 78 في المئة، وهو معدل يُعتبر مقبولاً في الإنتاج. ونظراً إلى أنه يمكن استمثال أداء الآلات الميكرويّة والدارات الميكرويّة كلٍّ على حدة، فإنه يمكن بهذه السيرورة إنتاج طيف واسع من المنظومات التي تحتوي على آلات ميكرويّة أكبر مقدرة وترانزستورات أصغر حجماً (انظر الشكل 1 ـ 2).

لا تعاني الدارات الإلكترونية المتوضِّعة على مسافة ميكرونات من آلة ميكرويّة تداخلَ الإشارات الضجيجية الناجمة عن السعة الكهربائية لأسلاك التوصيل الطويلة. لذا، يستطيع الباحثون من خلال تطبيق حمل ميكانيكي قياس تغيُّر السعة في أسنان القرص الدافع في أثناء حركته إلى الأمام والخلف، ومن ثَمَّ تحديد سرعة الآلة[4].

وفي حين أن الباحثين في أشباه الموصلات يجهدون لتطوير أدوات برمجية لنمذجة التجهيزات الإلكترونية المستقبلية، فإن نظراءهم في الهندسة الميكانيكية قاموا فعلاً بتطوير أدوات لتصميم آلات المستقبل النانوية.

**الشكل 1 ـ 2**: الأخدود (في أقصى اليمين)، الذي يساوي عمقه بضعة ميكرونات، يمكِّن من تصنيع آلات نانوية ذكية مختلفة في مختبرات ساندِيا. وتساعد الدارة الميكرويّة في اليسار، الموصولة مباشرة بذراع الآلة الميكرويّة على جعل التحكم المؤتمت بإلغاء الإشارات الشاردة التي تنجم عن الأسلاك الطويلة ممكناً.

في مختبرات أوك ريدج، يقوم الباحثون بنمذجة الآلات النانوية باستخدام خليط من الكيمياء الحوسبية والتقنيات الخاصة بهم. إن نماذج الآلات النانوية المرئية حاسوبياً ليست سوى نسخ ميكانيكية من نظيرات حيوية لها، من قبيل الفيروسات. وكل ما يفعله الباحثون هو تجميع الذرّات المختلفة بروابط كيميائية موجودة في الطبيعة من دون خرق لأي قانون علمي أساسي.

وقد أجرى أولئك الباحثون فعلاً محاكاة لكيفية تدفق السوائل عبر الآلات النانوية، ولسلوك محور وحامل غرافيتَين بسيطَين يتكوّنان من نحو 4000 ذرّة. وكان هدفهم معرفة كيفية صنع واستخدام تجهيزات ذريّة المقاس.

سوف تكون التقانة النانوية أعظم مجال للابتكارات التقنية خلال العشرين سنة القادمة. فهي سوف تمكّننا من التعامل مع المادة في مستوى الجُزَيئات، وسوف تقلب التصنيع رأساً على عقب بإمكاناتها شبه السحرية. إنها سوف تحوِّل العالم ليصبح قائماً فعلاً على اقتصاد المعلومات، وسوف تصبح سيرورة التصنيع مؤتمتة كلياً.

ماذا يمكننا أن نتوقَّع من التقانة النانوية الجُزَيئية؟ يُعرِّف المحترفون التقانة النانوية بأنها المقدرة على تصنيع التجهيزات الإفرادية واحدة تلو أخرى بوضع كل ذرّة في مكانها الصحيح. والغرض هو بناء أي بنية تقريباً متوافقة مع قوانين الفيزياء والكيمياء ويمكن توصيفها بالتفاصيل الذريّة. بكلمات أخرى، كل شيء من المركَبات الفضائية حتى الأعضاء البشرية هو لعبة مشروعة في التقانة النانوية.

أكثر من هذا، لن تكون تكلفة تصنيع تلك التجهيزات أعلى كثيراً من تكلفة المواد الأولية والطاقة اللازمتين لها. وفوق ذلك هو

أن التقانة النانوية قد تنتهي إلى إعادة كتابة كتاب التصنيع برمته.

يُقدِّر الباحثون أن المواد النانوية قد تمتلك بنية تشابه الليف الألماسي. وبإنتاجها بالشكل المرغوب فيه تماماً، يمكنها تحقيق نسبة قوة إلى وزن مرموقة. والطائرات والمرْكَبات الأرضية، وحتى المرْكَبات الفضائية، يمكن أن تكون جميعاً أخفّ بعشرات المرات من دون التضحية بالمتانة.

والبحث في الترانزستور الجُزَيئي جارٍ، ولا شك في أن الإلكترونيات الجُزَيئية يمكن أن تدخل في بعض التطورات المذهلة. لكنْ انظر في البنى الفيزيائية عموماً، لا الدارات فحسب، المبنية جُزَيئاً تلو آخر. حينئذٍ لن يكون في البنية الناتجة جُزَيء في غير مكانه، باستثناء الانزياحات الناجمة عن المفاعيل الحرارية أو التلف بسبب الإشعاع. لذا لن تكون فيها عملياً عيوب جُزَيئية تؤدّي إلى التشقّق والتمزّق، علاوة على أنها يمكن أن تكون خفيفة وفائقة القوة.

يقول خبراء التقانة النانوية أنه يمكن بناء هذه البنى بواسطة تقنيات التجميع الموضعي. والمقصود بذلك هي فكرة أذرع روبوتية بحجم الجُزَيء تلتقط وتنقل وتوضِّع الجُزَيئات واحداً تلو آخر، حيث يجري التحكم فيها بواسطة الحاسوب. وبتوفُّر ما يكفي من الأذرع الروبوتية الجُزَيئية للمهمة، يمكن بناء الأشياء المستخدمة في الحياة اليومية من أساسها.

ويقول أنصار التقانة النانوية إن ثمة الكثير من الفرص المتاحة للمواد المهندَسة جُزَيئاً تلو آخر والتي تُبنى لتشكِّل بنى ثلاثية الأبعاد. والفكرة هنا هي وضع الأجزاء الجُزَيئية في المواضع الصحيحة بحيث تترابط مع الجُزَيئات الأخرى بالطريقة الصحيحة تماماً.

قد يتطلب توضيع الجُزَيئات المنفصلة جنباً إلى جنب مكافئاً

نانوياً لأذرع وقبضات روبوتية يتحكم فيها الحاسوب، فالأذرع الروبوتية الجُزَيئية يمكن أن تكون قادرة على الحركة إلى الأمام والخلف لتسحب ذرّات من «مستودع إمداد» بغية بناء أي بنية يُرغب فيها.

وقد يكون على الأذرع الروبوتية النانوية أن تكون فائقة المتانة، وهذا يقود الباحثين إلى النظر في الألماس ليكون مادة محتملة للأذرع، لأن روابط الكربون ـ كربون فيها كثيفة وقوية.

ويقترح بعض المهندسين استخدام التوضيع الكيميائي للأبخرة لترسيب طبقات من الألماس في التطبيقات النانوية. إن التوضيع الكيميائي للأبخرة هو سيرورة مشابهة للدهان بالبخ يمكن أن تعطي سطح ألماس مغطّى بذرّات هيدروجين تجعله خاملاً.

وقد يكون من الضروري نزع بعض ذرّات الهيدروجين بغية كشف الروابط النشطة المتدلية. ويمكن لما يسمى بأداة انتزاع الهيدروجين أن تؤدّي هذه الوظيفة، وهي أداة بحجم الجُزَيء يجتذب أحد طرفيها الهيدروجين، في حين أن الطرف الآخر يعمل بوصفه «قبضة» خاملة. ويمكن لآلية توضيع مناسبة أن تُمسك بالقبضة وأن تمسح بالأداة ذرّات الهيدروجين لإزالتها.

يُحرز الباحثون لدى الجيش الأميركي والعلماء الأكاديميون تقدّماً في دراسة خيط العنكبوت الحريري، وفقاً لما ورد في محاضر أكاديمية العلوم الوطنية (National Academy of Science) التي نُشرت أخيراً.

إن ما يثير اهتمام الباحثين هو البروتين الذي يسمح للعنكبوت بالهبوط والتدلي، ويساعد الشبك على اصطياد الفرائس. فجُزَيئات البروتين مصمّمة كي تُسحب، وهي مرنة وقوية جداً. يمكن مطّ خيط

العنكبوت بمقدار 30 حتى 50 في المئة من طوله قبل أن ينقطع. إنه أقوى من الفولاذ، وقوته من رتبة قوة ليف كيفلار.

«لقد شهِد العقد الماضي زيادة ملحوظة في المنشورات العلمية عن خيط العنكبوت»، وفقاً لما ورد في محاضر أكاديمية العلوم القومية. «وسبب هذا الاهتمام به هو خواصه الميكانيكية المثيرة التي يتصف بها، في وقت يشهد اهتماماً بالمواد والمحاكيات الحيوية التي يجري تطويرها في حقل بحوث المواد المطَّرد التنامي».

لماذا يهتم الجيش الأميركي بهذه المادة؟ «إن السبب الرئيس للاهتمام بها هو استخدامها في صنع الملابس الواقية من الطلقات والدروع وأحزمة الأمان. ثمة الكثير من الإمكانات». هذا ما يدّعيه إمين أورودجف (Emin Oroudjev)، الباحث لدى جامعة كاليفورنيا في سانتا باربرا.

ينصَبّ الاهتمام في جامعة كاليفورنيا على البحث الأساسي في الكيفية التي يلتفّ بها البروتين، وكيفية ترتيبه ليصبح ليفاً حريرياً. باستخدام مجهر القوة الذريّة مع ساحب جُزَيئات، يحصل الباحثون على بعض الأفكار من التصوير وسحب البروتين. وتساعد هذه الأرصاد الباحثين على نمذجة ما يحصل في خيط العنكبوت الحريري حين تجمُّع بروتينات الحرير في ليف الخيط.

وقد وجدوا أنه يتألَّف من وحدات متماثلة متكررة حين غزله، وأنه يمتلك روابط مؤقتة تنقطع ويعاد بناؤها في أثناء رفع الحمل. وهذا مشابه لأنماط تكوُّن شوهدت في بروتينات حاملة أخرى.

وتوجد في حرير العنكبوت أجزاء متبلورة وأخرى أشد مرونة تشبه المطاط. وقد وجد الباحثون أن ثمة جُزَيئات منفصلة تحتوي على كليهما، وفق ما تقوله هيلين هانسما (Helen Hansma)، الأستاذة المساعدة في الفيزياء في جامعة كاليفورنيا[5].

ويركّز باحثون آخرون في معهد ماساشوستس للتقانة MIT اهتمامهم في إيجاد مواد لصنع ألياف كبيرة المقاومة يمكن أن يكون لها استخدام يوماً ما في الأربطة الصناعية، والمنسوجات المتخصّصة، والتروس الخفيفة الوزن المضادة للطلقات. إن حرير العنكبوت هو بوليمر يحتوي على منطقتين مختلفتين متناوبتين، إحداهما طرية ومرنة، والأخرى مكوَّنة من بلّورات صغيرة قاسية. وبناء على تلك البنية، يحاول أولئك الباحثون صنع سلسلة من البوليمرات الصناعية المختلفة، ودراسة كيفية تأثير تغيُّرات بنى البوليمرات الكيميائية في خواصها الفيزيائية. ويُجرى هذا البحث مترافقاً بدراسة تقنيات معالجة تحافظ على الخواص غير المألوفة للمادة الناتجة(6).

وقام باحثون في جامعة كاليفورنيا بتطوير بوليمرات مشابهة للبروتين تستطيع محاكاة نمو البلّورات التي يعتمد عليها حيوان أُذن البحر والمرجان في بناء قواقعهما القاسية والجميلة. يمكن استخدام هذه البوليمرات لتكوين نسج جراحة متقدمة ورقاقات حاسوبية ومكوّنات أخرى تعتمد على البناء المجهري للبنى المعقّدة، وفق رأي العلماء.

صحيحٌ أن قواقع حيوان أُذن البحر مصنوعة من المادة نفسها التي يتكوَّن منها حجر الجير الهش، إلا أنها قاسية جداً ويمكن دق المسامير بها. فبروتينات القوقعة الفريدة الشكل تجعل بلّورات الكلسيت (Calcite) والأراغونيت (Aragonite) تنمو في لبِنات متماسكة، وهذا ما يعطيها قوتها. وبرغم أن البروتينات لا تمثل سوى 1 في المئة من وزن القوقعة، فإن القوقعة أقوى بألف مرة من مادة مصنوعة من تلك البلّورات فقط.

تتأثر الخواص الفيزيائية للأجسام الصلبة كثيراً بترتيب الذرّات الموجودة في شبكة المادة. ويمكن للمنظومات المبنية نانوياً أن توفّر خواص محسّنة وجديدة مقارنةً مع خواص المواد الكبيرة. لذا، فإن تأثير ملتقيات الحُبيْبات وأطوارها البينية في هذه المواد على درجة من الأهمية، لأن التفاعل بين الحُبيْبات يمكن أن يؤدّي إلى خواص كيميائية وفيزيائية جديدة.

وفي الآونة الأخيرة، كان هناك اهتمام كبير بالمواد المركَّبة ذات البنية النانوية. وسبب هذا الاهتمام هو تطبيقاتها المثيرة الممكنة التي تمتد من المحفِّزات الكيميائية الجديدة حتى تحضير المواد السيراميكية النانوية، مع التحسينات الكبيرة التي تُدخلها في خواصها.

فقد أبدت المواد المركَّبة السيراميكية، التي تُصنع بنشر جُسيْمات نانوية من مكوِّن أول ضمن جُسيْمات كبيرة من مكوِّن آخر، تحسينات من هذا القبيل في الخواص الميكانيكية (مواد مركَّبة ميكرويّة/ نانوية). وعلى وجه الخصوص، تم الحصول على لدانة فائقة من مزج مكوِّنين لهما حجم الحُبَيْبات ذاته (مادتان مركَّبتان نانويتان).

وجرى استخدام طرائق تحضير مختلفة لصنع جُسيْمات نانوية الحجم بكميات كبيرة. ومن تلك الطرائق التي جرى تطويرها الحفر الليزري لأجسام صلبة، وتفاعلات بلازمية أو تفاعلات محرّضة بالبلازما أو الليزر لخلائط غازية. وثمة طرائق أخرى من قبيل التكثُّف البخاري، والطحن بالكرات (Ball Milling)، والتركيب الذاتي الانتشار العالي الحرارة، وسيرورة المحلول ـ هلام (Sol-Gel)، وتجفيف المحاليل بالبخ، والتحطيم الحراري للهباب، والتفكيك الكيميائي للأبخرة عند ضغط منخفض.

ومع التقدم في حقل المواد اليوم، تُنتَج مكوّنات أو تجهيزات هندسية تختلف مقاساتها بين 1 ملم و1 م. لكن آلات المستقبل

الميكرويّة يمكن أن تكون ذات مقاسات تبلغ بصغرها $10^{-5}$ م. لقد تم تصنيع دارات إلكترونية تصل بصغرها حتى $10^{-7}$ م فعلاً. أما عند المقاسات التي هي أصغر من ذلك، فثمة تراكيب جُزَيئية وذريّة وعيوب تهدّد الأسس الجوهرية لخواص المواد التي يجري استخدامها. وفي المستقبل، سوف نرى مزيداً من تفصيل الخواص لأغراض محدّدة مع تعلمنا لاستخدام أدوات جديدة، من قبيل تلك التي تستطيع التعامل مع الذرّات.

وسوف تستمر التطورات التي من هذا القبيل خلال العقد القادم، منها ما حصل التوقّع به، وأخرى ما زالت مجهولة. وهذا الكتاب، في خضم تطور تقانات المواد الجديدة تلك، سوف يبيّن كيف أن التقانة الحاسوبية سوف تؤدّي دوراً متنامياً في تصميم المواد والسيرورات الجديدة، وكيف سنتحكم في البنية الميكرويّة بطرائق جديدة، تساعدنا في ذلك مصادر طاقة وبرمجيات وتجهيزات تحليلية جديدة.

## الهوامش

1 - jack.lackey@gtri.edu, *Design News* (22 January 1996), p. 9.
2 - K. Breslau, «Tiny Weapons with Giant Potential», *Newsweek* (June 24, 2002, pp. 72-75.
3 - C. E. McChesney and J. R. Dole, «Higher Performance in Liquid Crystal Polymers,» *Mod. Plast.* (January 1998), pp. 112-118.
4 - L. Trego, «Intelligent Micromachines,» *Aerospace Engrg.*, (July 1996), p. 35.
5 - <http://www.netcomposites.com/news.asp?1259> (24 June 2002), pp. 5-6, 24.
6 - *Machine Design* (June 19, 2003), p. 41.

# 2

# التقانة النانوية

## علم النانويات/ التقانة النانوية

التقانة النانوية هي علم وهندسة تكوين مواد وبنى وظيفية وتجهيزات تقع أبعادها في سلم النانومتر. في المصطلحات العلمية، «نانو» تعني $10^{-9}$، والنانومتر الواحد يساوي جزءاً واحداً من ألف جزء من المكرومتر، أو جزءاً واحداً من مليون جزء من الميليمتر، أو جزءاً واحداً من مليار جزء من المتر. ويمكن للمواد العضوية وغير العضوية والحيوية النانوية البنية أن تكون قد وُجدت في الطبيعة منذ ظهور الحياة على الأرض. ومن الأمثلة الجلية على ذلك المتعضيات الميكرويّة والحُبيْبات المعدنية الدقيقة في الصخور والجُسيْمات النانوية في الجراثيم والدخان. وفي الجانب الحيوي، يبلغ قطر الحلزون المضاعف في الدَنا (DNA) 2 نانومتر، في حين أن قطر الريباسة (Ribosome) يساوي 25 نانومتر. أما أقطار الذرّات فتتراوح بين 1 و4 أنغسترومات. لذا فإن المواد ذات البنى النانوية يمكن أن تتكوَّن من عشرات آلاف الذرّات. إن المثال المعبِّر في سلم المكرومتر هو شعرة الإنسان التي يتراوح قطرها بين 50 و100 مكرومتر.

ما الذي يفتننا بتصغير المواد حتى السلَّم النانوي؟ إن خواص

المواد الفيزيائية والكيميائية والحيوية تتبدل على نحو مدهش حينما تتقلَّص مقاسات الحُبيْبات المكوِّنة لها إلى سلَّم النانومتر من حيث الحجم والشكل وكيمياء السطح والطوبولوجيا. على سبيل المثال، تُبدي حُبيْبات النحاس التي يساوي قطرها 5 نانومتر قساوة تساوي خمسة أضعاف قساوة النحاس المألوف. ويمكن جعل سلنيد الكادميوم (CdSe) (Cadium Selenide) يُنتج أي لون من ألوان الطيف عبر التحكم في مقاس حُبيْباته. لذا ولَّدت التقانة النانوية كثيراً من الاهتمام في المجتمع العلمي، وأصبحت مجال بحث نشِط. ثمة عدة برامج حكومية رئيسة للبحث والتطوير في مجال المواد النانوية البنية والتقانة النانوية في الولايات المتحدة وأوروبا وآسيا. وسوف تتطوَّر رؤية جديدة للتقانة النانوية الجُزَيئية في السنوات المقبلة، ويمكن أن نرى كثيراً من الفتوحات التقانية في تكوين المواد باستخدام ذرّة تلو أخرى. وسوف يكون للاختراعات الناتجة الجديدة تأثير كبير في العلم والطب والهندسة.

لقد أصبح استخدام المصطلحين **علم النانويات** و**التقانة النانوية** واسع الانتشار، وهما يتضمنان مجالاً كبيراً من التخصُّصات والتقانات التي يُتوقَّع أن تكون مطَّردة الأهمية خلال السنوات العشر أو العشرين القادمة. وفي تطبيقات الإلكترونيات والطب الحيوي والكيمياء والمُحِسَّات وتقانة المعلومات، ثمة عامل مشترك هو أن المواد والتقنيات والتجهيزات، والنظم في بعض الحالات، سوف تتضمن بُعداً حرجاً أو أكثر في سلم النانومتر.

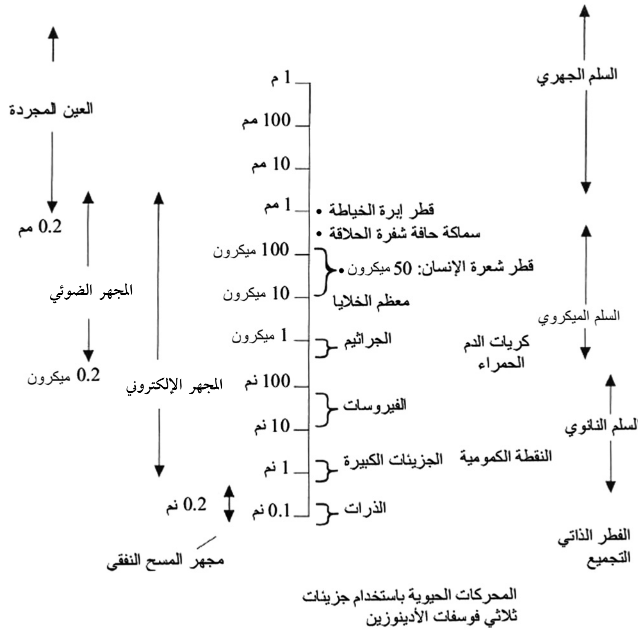
أتت البادئة **نانو** (Nano) من الكلمة الإغريقية «nanos» التي تعني «قزم» أو «صغير جداً». غالباً ما تُستخدم هذه الكلمة لوصف ظاهرة أو تطبيق ما من قبيل الإلكترونيات والمغنطيسات النانوية، بناءً على إدراك أنها تصف سلم الأطوال المسؤول عن تلك الظاهرة الفريدة. يمتد سلَّم النانو من 1 حتى 100 نانومتر، وهي المنطقة

الوسطى بين سلَّم الميكرون الذي تقع فيه تقانة الدارات المتكاملة، والسلَّم الجُزَيئي، الذي تقع فيه الكيمياء التركيبية. لمزيد من الإيضاح، الحد الأدنى، النانومتر الواحد يساوي تقريباً طول ثلاث ذرّات مصطفة على خط واحد، وهو أصغر بنحو 000 50 مرة من قطر شعرة الإنسان. يبيّن الشكل 2 ـ 1 المدى التقريبي للسلالم الثلاثة: النانوي والميكروي والجهري، ومقاسات بعض الأشياء المألوفة في كل منها، وتقنيات الرصد الشائعة، من العين المجرّدة حتى المجاهر المتقدمة[1][2].

«ثمة حيز واسع في الأسفل»، هذا ما قاله ريتشارد فينمان (Richard Feynman) في عام 1959 في معهد كاليفورنيا للتقانة حين طرح التحدي المتمثّل بوضع جميع المنشورات والكتب المهمة في العالم ضمن ذاكرة ذريّة حجمها 0,5 ميليمتر مكعب، أي ما يساوي تقريباً حجم بذرة نبات الخشخاش، والتحدّي المتمثّل بصنع حواسيب وآلات ضئيلة تمكِّن الإنسان من التعامل مع الذرّات فرادى. قال فينمان: «ضع الذرّات حيث يقول الكيميائي، وبذلك تصنع الجوهر».

وفي سبعينيات القرن العشرين، بدأ إريك درِكسلر (Eric Drexler)، الداعي إلى استغلال الصغريات في المستقبل، بتحدّي حدود الممكن بـ «مجمِّعات» افتراضية ذريّة الحجم مبرمجة لصنع أو تعديل أي شيء تقريباً. أما المصطلح تقانة نانوية (Nanotechnology) الذي صاغه نوبوهيكو تانيغوشي (Nobuhiko Taniguchi) في عام 1974، فيشير إلى حقل معالجة وتصنيع المواد عند مقاسات تقل عن 200 نانومتر. وأضحى هذا الحقل امتداداً طبيعياً لعالَم الإلكترونيات الميكرويّة المعهودة، حيث يجري الآن إنتاج تجهيزات ذات سمات نانوية المقاس كمياً. وفي اجتماع لوكالة الفضاء الأوروبية ESA في نوردفيك في عام 2001، ظهر المُختصر MNT ليعبر عن هذا التأثير المتبادل بين التقانتين الميكرويّة والنانوية.

التقانة الميكرويّة النانوية MNT هي تقانة تركيب ومكاملة المواد والذواكر والتجهيزات التي تتراوح مقاساتها بين أجزاء من الميكرون والميليمتر، وهي تقانة نجم عنها حقل تقني جديد هو حقل الهندسة الميكرويّة. تتكامل في هذا الحقل عدة تخصّصات مختلفة: البنية التحتية المعهودة للإلكترونيات الميكرويّة، ومعالجة سطوح ثنائية وثلاثية الأبعاد لأغراض الطاقة والمُحِسَّات ومعالجة البيانات والاتصالات، وتشغيل ميكانيكي مكروي ثلاثي الأبعاد لتشكيل عناصر آلات مجهرية متحركة للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة (Micro Electro Mechanical Systems) (MEMS).




**الشكل 2 ـ 1: سلَّم النانو**

تعود هذه التقانات في أصلها إلى البنية التحتية للمعالجة الميكرويّة الإلكترونية. وحين ضمها إلى طرائق معالجة المواد النانوية، فإنهما تحقّقان معاً قفزات واسعة في توفير تجهيزات تطبيقية تتميز بالاستهلاك المنخفض للطاقة، وتمكّنان من استخدام الإلكترونيات الكمومية التطبيقية في الذواكر العالية الكثافة، وتوفّران تجهيزات حوسبة فائقة السرعة، وسوف تكونان على صلة وثيقة بالدارات والنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الأخرى التي تُستخدم في التصاميم التي سوف تُنتَج كمياً.

إن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مألوفة اليوم لدى كثير من المهندسين. تصنع هذه الآلات الضئيلة، المتأخرة بضع خطوات فقط عن سلَّم مقاسات الإلكترونيات الميكرويّة، من مواد متقدمة مستخدمة في صناعة أنصاف النواقل، وبطرائق تلك الصناعة. لقد تحقَّق سريعاً التحدي، الذي طرحه فينمان بخصوص اختراع محرّك كهربائي دوّار، قابل للتحكم فيه وحجمه يساوي نصف ميليمتر مكعب، وأصبح الآن متخلفاً جداً مقارنة بالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة التي يجري إنتاجها كمياً، ومنها المسنّنات والمحاور والعنفات الضئيلة التي تساوي أحجامها نصف ذلك الحجم.

سوف يكون علم النانويات والتقانة النانوية القوة المهيمنة في مجتمعنا في العقود المقبلة، فالإنجازات الاقتصادية الأولية التي تحقَّقت فعلاً شاهد على أن الفتوحات العلمية في السلم النانوي يمكن أن تغيِّر مفاهيم الإنتاج وتولِّد ثورة في عالم الأعمال. لكن الرؤية التفصيلية لمفعول التقانة النانوية تتطلب استقصاء ما تتضمنه عملياً وما لا تتضمنه.

يمكن فهم «العالَم النانوي» على أنه يتكوَّن من ثلاثة نطاقات: علم النانويات، والتقانات النانوية، والتقانات التي تُستخدم فيها التقانة

النانوية. إن علم النانويات هو مجموعة المحاولات الجوهرية لفهم العلاقة بين بنية المادة وخواصها، وإيجاد الأدوات اللازمة التي تمكِّن من تجميع المكوِّنات النانوية وتوصيفها. أما التقانات النانوية، أي الإلكترونيات الحديثة والآلات النانوية، فتمثّل قطاعات اقتصادية جديدة توسِّع إطار الجدوى وتولِّد أفكاراً جديدة وتستحوذ على انتباه الجمهور.

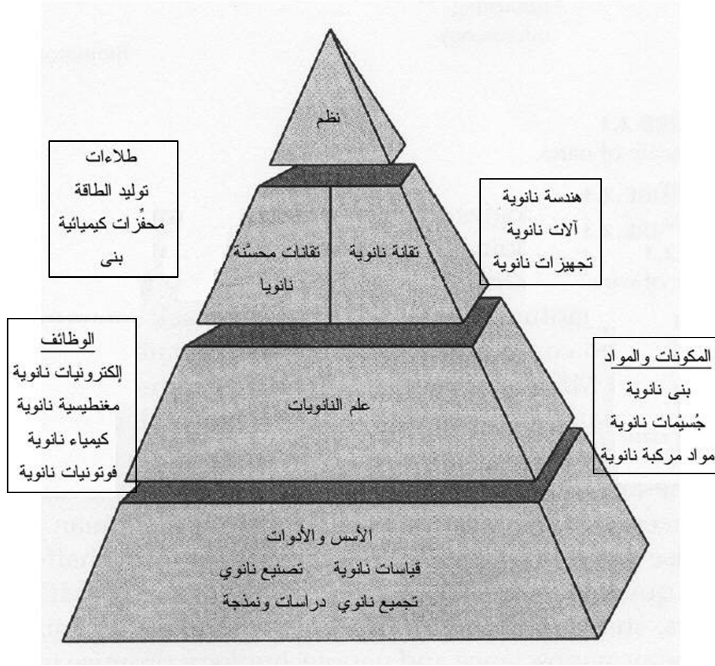
إنّ الأفكار الثورية التي يوفِّرها علم النانويات سوف تغيِّر جذرياً قطاعات التقانة الموجودة حالياً، ومنها محفِّزات التفاعلات الكيميائية والتغشية والمواد المقوَّاة وتوليد الطاقة وخزنها... إلخ، وسوف تحقِّق أعظم مردود اقتصادي فيها. تمثِّل هذه التقانات النطاق الأخير من العالَم النانوي الذي يلخص الشكل 2 ـ 2 العلاقة بين نطاقاته الثلاثة.

وضع مجلس العلوم والتقانة الوطني في أميركا (National Science and Technology council) رؤية لهذه المواد الجديدة التي يجري صنعها لأغراض محدّدة، مبيِّناً أنه يمكن أن تكون لتلك المواد وظائف متعدّدة، وأن تكون قادرة على تحسُّس المحيط والاستجابة له. وقد تخيَّل الباحثون أيضاً مواد يمكن أن تكون أقوى من الفولاذ بعشر مرات، أو أخفّ من الورق بعشر مرات، أو مؤقتة المغنطة أو فائقة الناقلية، وربما شفّافة للضوء، ولكثير منها درجة انصهار عالية.

وعند استخدام التقانة النانوية في خزن البيانات في ذاكرة حاسوبية، فقد تمكِّن من وضع كامل محتوى مكتبة الكونغرس الأميركي في تجهيزة حجمها يساوي حجم مكعب من السكر.

يقول نيل لاين (Neal Lane)، المستشار العلمي للرئيس الأميركي، إن التقانة النانوية هي مجال العلم والهندسة الذي سوف يتمخَّض عن معظم فتوحات الغد العلمية والتقانية. إنها ليست خطوة

أخرى على طريق التصغير فحسب، بل هي سلَّم مقاسات جديد كلياً يهيمن فيه الميكانيك الكمومي على سلوك المادة.




**الشكل 2 ـ 2: الترابط الهيكلي للعالم النانوي**

ما يُفهم من ذلك هو أن علم النانويات هو سلَّم المقاسات الذي تتحدَّد فيه الخواص الجوهرية للمادة، والذي يمكن فيه هندسة تلك الخواص. لقد بيَّنت الفتوحات العلمية السابقة، في مجالات من قبيل تغشية الأقراص الصلبة والمستحضرات الصيدلانية، كيف أنها استطاعت توليد ثورة في أعمال بلغت رؤوس الأموال فيها مليارات الدولارات. وثمة ما يبشِّر بمشهد مماثل من التطورات المستقبلية، فقد حصلت أخيراً بضعة اكتشافات في بنية المادة المنتظمة، من قبيل

الأنابيب الكربونية النانوية، والمحرّكات الجُزَيئية، والنقاط الكمومية، والمفاتيح الجُزَيئية.

يكمن اهتمامنا الرئيس هنا في إيجاد مواد لها خواص فيزيائية وكيميائية جديدة محسَّنة في المستوى الجُزَيئي. وثمة جوانب محدّدة في العالم النانوي تأسر خيال الباحثين:

● تتعلّق التأثيرات الإلكترونية والذريّة المتبادلة بالتغيُّرات التي تحصل في السلَّم النانوي. لذا فإن تشكيل بنية المادة في مستوى النانومتر يجب أن يمكِّن من التحكم في خواصها الجوهرية من قبيل المغنطة وسعة الشحنات الكهربائية وعمليات تحفيز التفاعلات الكيميائية، من دون تغيير التركيب الكيميائي للمادة.

● تتصف النظم الحيوية ببنية منتظمة في السلم النانوي، وهذا يجب أن يمكِّن من وضع مكوِّنات وتجهيزات صناعية داخل خلايا الجسم لصنع مواد جديدة منتظمة البنية ذات توافق حيوي كبير، محاكية بذلك طرائق التجميع الذاتي الذي يحصل في الطبيعة.

● تمتلك المكوّنات النانوية مساحة سطحية كبيرة جداً، وهذا يجعلها مثالية لاستعمالها بصفتها محفِّزات أو ماصَّات في التفاعلات الكيميائية، وفي نظم توزيع الطاقة الكهربائية، وفي تزويد خلايا جسم الإنسان بالدواء.

● يمكن للمواد المبنية نانوياً أن تكون أقسى وأقل هشاشة من المواد الكبيرة التي لها التركيب نفسه. ويعتقد العلماء أن الجُسيْمات النانوية سوف تكون أصغر من أن تحصل فيها عيوب سطحية، وسوف تكون أقسى بسبب طاقتها السطحية العالية، ونتيجة لذلك سوف تكون مفيدة لبناء مواد مركَّبة قوية جداً.

● نظراً إلى أن الأبعاد في المستوى النانوي تقل كثيراً عن تلك

التي في البنى الميكرويّة، فإن التفاعلات سوف تحصل بسرعة أكبر، وهذا ما يؤدي إلى نظم أقل استهلاكاً للطاقة وأسرع أداء.

بعد عقدٍ من تراكم الخبرات، بدأت التقانة النانوية بإحراز أول نجاح اقتصادي لها، إلا أن المواد الأساسية المستخدمة تقوم على تصوّرات مبكرة ومثيرة تخصّ روبوتات نانوية لمعالجة السرطان والسيارات الذاتية التجميع. إن تطوير مواد في السلَّم المكروي (أي عناصر بجُسيْمات تقع مقاساتها بين 1 و100 نانومتر) هو خطوة أساسية في الإنتاج النهائي لآلات وإلكترونيات وتجهيزات طبية نانوية أشدّ تعقيداً. وفي الواقع، ليس الانتقال إلى التقانة النانوية إلا استمراراً لمساعي التصغير القائمة في كثير من القطاعات الصناعية، حيث سار البحث في اتجاهين اثنين: تقليص مقاسات مواد تصنيع موجودة من قبيل أكاسيد المعادن باستخدام تقانات إنتاج جديدة، وتطوير مواد جديدة كلياً، من قبيل الأنابيب النانوية وكرات بَكِّي النانوية المقاس أصلاً.

ويُتوقَّع أن تتجاوز سوق المواد النانوية في الولايات المتحدة المليار دولار في عام 2007، وأن تصل إلى 35 مليار دولار في عام 2020 (مقارنة بـ 125 مليون دولار في عام 2000)[69]. سوف يأتي النمو في البداية من تطبيقات مطلوبة تشمل كامل قطاع التصنيع في الولايات المتحدة، منها مواد صقل ركائز الدارات المتكاملة، ووسائط الخزن العالية الكثافة في صناعة الإلكترونيات، ومساعدات التشخيص المحسَّنة للاستخدامات الطبية، ومواد التجميل الشفّافة الواقية من أشعة الشمس، والملابس المقاومة للاتساخ، والأرضيات المقاومة للاهتراء، وتجهيزات التغشية المنخفضة التكلفة للصناعات الحربية، ومكوّنات تخفيض استهلاك الوقود لصناعة الآليات، وورق وحبر أفضل لصناعة الطباعة. أما على المدى البعيد، فيُتوقَّع أن تأتي

أفضل الفرص من مجالي الرعاية الصحية والإلكترونيات اللذين يُتوقَّع أن يستحوذا على ثلثي السوق تقريباً بحلول عام 2020.

أما المنتجات العادية، وخصوصاً الأشكال الصغيرة من المنتجات الموجودة من قبيل ثاني أُكسيد السليكون وثاني أُكسيد التيتانيوم والصلصال، فيتوقع أن تسجِّل نمواً كبيراً خلال مدة التوقّع تلك وما بعدها. وقد أثبتت هذه المواد وجودها في السوق فعلاً في تطبيقات من قبيل مواد التجميل الواقية من الشمس ومعاجين التلميع الميكانيكية الكيميائية.

وسوف تستحوذ المواد النانوية العادية على معظم الطلب الكلي في المستقبل المنظور. إلا أنه يُتوقَّع أن تسجل المواد النانوية الجديدة، التي ما زال كثير منها ينتظر التسويق، نمواً أفضل، انطلاقاً من القاعدة الضحلة التي تكوَّنت في عام 2002، فأنابيب الكربون النانوية، وهي أهم المنتَجات ضمن فئة المواد الجديدة، مرشّحة للاستخدام الآن في المواد المركَّبة المتخصِّصة، وفي البوليمرات الفلورية.

## التصنيع والتجميع النانويان

لاستغلال الخواص الفريدة للمواد النانوية، يجب تطوير تقنيات تمكِّن من التعامل مع المواد في السلّم النانوي. وهذا هو مجال التصنيع والتجميع النانويين. يمكن اعتبار التصنيع نهجاً نزولياً (Top Down)، والتجميع نهجاً صعودياً (Bottom - Up).

في النهج النزولي للتقانة النانوية، تُجعل الأشياء الكبيرة أصغر باتباع تقنيات التصغير. إنّ تقنيات إزالة الذرّات من بنية ما (من قبيل الحفر المبلول والجاف) وتقنيات إضافة ذرّات إليها (من قبيل الأكسدة

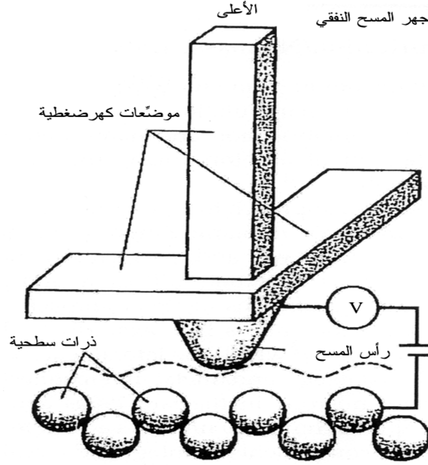
والتغلغل والطلي الكهربائي) بطرائق متحكَّم فيها هي أسس هذا النهج. يمكن تمثيل النهج النزولي للوصول إلى السلَّم النانوي على أفضل وجه بتطوُّر الدارة المتكاملة التي انخفض فيها عرض الخط المميز للترانزستورات والتماسات والتوصيلات المعدنية تدريجياً من عدة ميكرونات في أواخر ستينيات وأوائل سبعينيات القرن العشرين حتى أبعاد تقترب حالياً من 100 نانومتر. ولما كانت ارتفاعات الخطوط غالباً أصغر من 100 نانومتر، فإن مكوِّنات الدارات المتكاملة متجهة اليوم لتدخل عالم السلم النانوي بوصفها بنى نانوية ثلاثية الأبعاد حقاً.

أما النهج البديل للنهج النزولي فهو النهج الصعودي الذي توقّع به فينمان. وهذا هو مجال الكيمياء وعلم الغرويات، ويشتمل على طرائق تحضير الجُزَيئات الكبيرة والجُزَيئات الشجرية التشعّب (الدندريمية) وكيمياء الضم، وتحضير الجُسيْمات النانوية بوساطة عوامل خفض التوتر السطحي. إن هذا المفهوم الصعودي الجوهري، الذي قام بصياغته دركسلر، يقوم على تجميع بنى نانوية من مكوّنات ذريّة أو جُزَيئية. وهذا ما كان يسمّى أحياناً بالهندسة الجُزَيئية أو التقانة النانوية الجُزَيئية. لقد جرى تطوير كثير من النماذج الرياضية والتوقّعات بواسطة الحاسوب لمكوِّنات جُزَيئية من قبيل المحامل (Bearings) والمسننات (Gears) (التي تنتظر تحقيقها عملياً. إن التجميع الذري والجُزَيئي يحقِّقان تقدماً باستخدام تقنيات من قبيل مجهر المسح النفقي المبيّن في الشكل 2 ـ 3، لكننا ما زلنا فعلاً بعيدين جداً عن تعديل وتصنيع بنى نانوية في المستوى الذري أو الجُزَيئي.

### المعالجة بالثاقبة الذريّة

يبيّن الشكل 2 ـ 4 التطور الزمني لدقة معالجة المواد. باستقراء منحني التشغيل الفائق الدقة في الشكل 2 ـ 4 حتى السنوات الأولى

من القرن الحادي والعشرين، فإن دقة المعالجة تصل إلى المستوى النانوي. أكثر من هذا، يُعبَّر عن دقة المعالجة بمجموع الخطأ المنهجي والخطأ العشوائي، وفق المبيّن في الجزء الأسفل من الشكل 2 ـ 4[3].

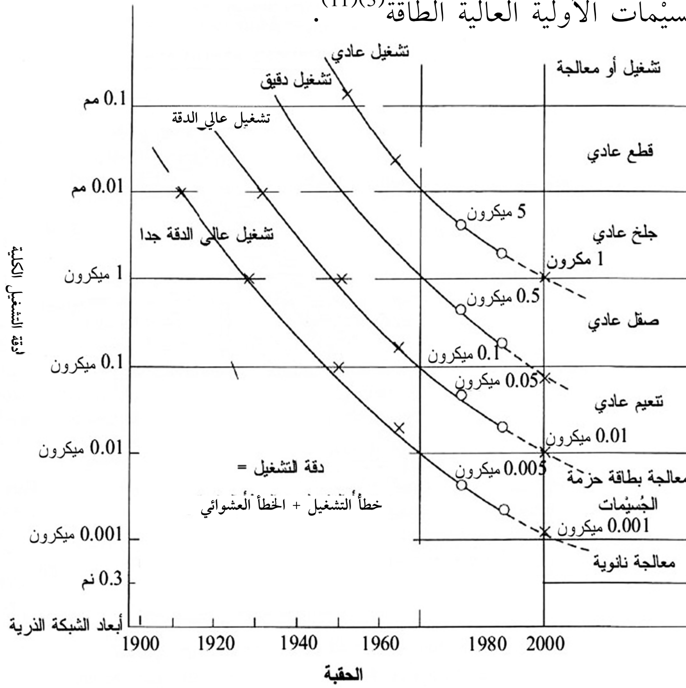



**الشكل 2 ـ 3: رسم توضيحي لمجهر المسح النفقي.**

إنه لمن الضروري استخدام وحدة معالجة من حجم ريشة التثقيب الذريّة (Atomic Bit) للحصول على دقة عالية ومنتجات ناعمة في السلم النانوي. تتضمن هذه المعالجة سيرورات إزالة وتغيير شكل وتصليد من حجم الثاقبة الذريّة[4][5]. تسمى كثافة الطاقة اللازمة للمعالجة بالثاقبة الذريّة عتبة طاقة المعالجة النوعية (Specific Processing Energy).

في المعالجة بالثاقبة الذريّة، يجب أن تكون طاقة المعالجة، التي هي أعلى من عتبة طاقة المعالجة النوعية، متركزة في الذرّة المستهدفة. في المعالجة الميكانيكية، تمرَّر الطاقة عبر رأس ذي حافة حادة لكاشط دقيق شديد القساوة (من قبيل الألماس والـ SiC والـ $Al_2O_3$) يمتلك طاقة ربط نوعية أكبر من تلك التي للقطعة

المشغَّلة. أما في المعالجة الذريّة، فلا يمكن استخدام أدوات القطع العادية بسبب طاقة الربط الشبكية الذريَّة المنخفضة التي تتصف بها، وما يوافقها من قساوة مقاومة الخدوش المنخفضة والاهتراء الناجم عن الكشط السريع الناجم عن الإجهاد العالي الكثافة لرأس الأداة. في المعالجة الفيزيائية، يجري التزويد بالطاقة عبر حُزم جُسيْمات عالية الطاقة من قبيل الفوتونات والإلكترونات والشوارد والذرّات المبخرة. وفي المعالجة الكيميائية، يحصل التزويد بالطاقة عبر ذرّات فاعلة كيميائياً، يجري تفعيلها حرارياً أو كهروكيميائياً. يبيّن الجدول 1 ـ 2 تفاصيل المعالجة بالثاقبة الذريّة للمواد فيزيائياً وكيميائياً بواسطة الجُسيْمات الأولية العالية الطاقة[5][11].




**الشكل 2 ـ 4: دقة التشغيل المتحقّقة في الحقب المختلفة.**

**ملاحظة**: حذف المترجم جزءاً من الشكل والتعليق عليه لعدم صلته بالنص.

## المواد النانوية

ثمة كثير من التقانات المستقبلية المثيرة للاهتمام تحت المظلة النانوية، ومعظمها يعتمد على الإنجازات الشاملة السريعة في تطوير المواد في المجال النانوي. يُستخدم المصطلح **مادة نانوية** غالباً ليشمل الطيف الواسع للمواد ذات البنى النانوية، والتي تقع مقاساتها في السلّم النانوي، اللازمة لتحقيق تلك التقانات، ومنها تقانات التطبيقات الوظيفية والبنيوية. في الطرف الأول، ثمة المواد الكبيرة التي تُعالَج خصيصاً لتطوير بنية نانوية ذات شكل ما من قبيل التبلور النانوي. وفي الطرف الآخر، ثمة مواد ينصبّ فيها الاهتمام على وحدات نانوية إفرادية، من قبيل الجُسيْمات النانوية والعناقيد النانوية والبنى فوق الجُزَيئية. وما بين هذين الطرفين هناك عدد هائل من المواد المحتملة التي تضم مكوّنات مختلفة ذات تنوُّع كبير من الأشكال والترتيبات، وهي ما يسمّى بالمواد المركَّبة النانوية. وفي المادة ذات البنية النانوية، يمكن للمكوِّن النانوي أن يقوم بالأداء الوظيفي كاملاً، وأن يُحشر ببساطة ضمن ركيزة حاملة، أو يمكن للركيزة أو القالب أن توفِّر شكلاً أو ترتيباً معيناً للمكوِّن النانوي بغية تطوير خواص أو وظائف معينة. لكن ما هو أهم كثيراً في هذا السلّم النانوي هو أن المسافات بين المكوّنات النانوية تصبح من رتبة مقاسات المكوّنات. لذا، خلافاً لمواد السلّم الميكرويّ، تكون المواد الموجودة بين المكوّنات النانوية نانوية أيضاً، وهذا ما يجعلها تُبدي أبعاداً جديدة وعموماً، إن ما يميّز المادة النانوية من نظيرتها المعهودة، المماثلة لها كيميائياً، ليس امتلاكها لأشكال في السلّم النانوي فحسب، بل هو انهيار قوانين الأبعاد. هذا يعني أن واحدة من خواص المادة أو أكثر سوف تختلف (جذرياً) عما هو متوقع من مجرد الانتقال البسيط من السلّمين الجهري والميكروي (أكبر من 0,1 ميكرون) إلى السلّم النانوي.

**الجدول 2 ـ 1**: معالجة المواد بالثاقبة الذريّة باستخدام حزمة الطاقة.

| النوع | آلية المعالجة (مقاس الثاقبة الذريّة) | طريقة المعالجة (حزمة جُسيْمات طاقة) | نظام التحكم بدقة الأبعاد: عمق (وحيد البعد)، شكل (ثنائي الأبعاد)، هيئة (ثلاثية الأبعاد) |
|---|---|---|---|
| إزالة مجموعة ذرّات | | | |
| قطع نانوي | قص، قطع بالشد، ثقب ذري | قطع ناعم بأداة ألماسية وحيدة النقطة، (للمواد الطرية)، صقل فائق النعومة | دقة الهيئة وخشونة السطح (تعتمد على دقة أداة التشغيل) |
| تلميع فائق | تشغيل إخفاق ذري مرن، إزالة بالتفاعل الكيميائي (صلب، بت ذريّة، كسر) | تلميع من دون تماس EEM، تشغيل سائل مغنطيسي، تلميع فائق النعومة (للمواد القاسية) | دقة الهيئة (أداة التلميع)، دقة الهيئة والعمق (ميكرون) |
| فصل بالثقب الذري (إزالة) | تفكيك كيميائي (غاز، سائل، صلب) (تفعيل حراري) | حفر كيميائي (متناحي، لامتناحي)، حفر بلازمي تفاعلي، تشغيل ميكانيكي كيميائي، تشغيل كيميائي ميكانيكي (شوارد، حفر ضوئي بمساعدة حزمة ليزرية) | دقة الهيئة (الهيئة المشكلة مسبقاً)، دقة العمق (مقاس كبير)، دقة الشكل (دقة القناع) |
| | تفكيك كهروكيميائي (سائل، صلب) (تفعيل كهروليتي) تبخير (حراري) (غاز، صلب) | تلميع كهروليتي، معالجة كهروليتية (حفر) تشغيل بالحزمة الإلكترونية، تشغيل بالليزر، تشغيل حراري | دقة الهيئة (الهيئة المشكلة مسبقاً)، دقة العمق (مقاس كبير)، دقة الشكل (القناع) دقة التوضيع الخطي (متحكم فيها)، دقة المستوي (مقاس كبير)، دقة العمق. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | فصل بالتغلّل (حراري) (صلب، سائل، غاز) | إزالة بالتغلّل (انحلال) | دقة الشكل (دقة القناع)، دقة الهيئة (مقاس كبير)، دقة العمق (مقاس كبير). |
| | فصل انصهاري (حراري) (سائل، غاز، صلب) | إزالة الصُهارة | دقة الشكل (دقة القناع)، دقة الهيئة (مقاس كبير)، دقة العمق (مقاس كبير). |
| | ترذيذ شاردي (صلب) (ديناميكي) | تشغيل بالرذاذ الشاردي (شوارد نشطة)، تشغيل رذاذي (حفر شاردي نشط). | دقة التحكم بموضع الشكل (وفق القناع)، دقة الهيئة (مقاس كبير)، دقة العمق (مقاس ميكروي)، دقة الهيئة (هيئة مشكلة مسبقاً). |
| | ترذيذ فوتوني (صلب) (ديناميكي) | قطع روابط فوتوني مباشر (ليزر فوق بنفسجي، أشعة سينية) | |
| تصليد بالثاقبة الذريّة (إضافة طبقات) | إزالة ذرّات السطح المتأينة بالحقل الكهربائي | تبخير بالحقل الكهربائي (معالجة STM، معالجة AFM) | نظام تحكم STM في السلم الذري |
| | توضيع وربط كيميائي (غاز، سائل، صلب) | طلي كيميائي، طلي في الطور الغازي، أكسدة، نتردة، طلاء قائم على التفاعل | دقة الشكل (دقة القناع)، دقة السماكة (مقاس كبير) |
| | توضيع وربط كهروكيميائي (غاز، سائل، صلب) | طلاء كهربائي، تشكيل كهربائي بالأكسدة المصعدية، تشكيل بالتهجير الكهربائي | دقة الشكل (دقة قناع القالب)، دقة السماكة (مقاس ميكروي) |
| | ترسيب وربط حراري (غاز، سائل، صلب) | ترسيب بخاري، تنمية بلورية طبقية منتظمة (إبيتاكسي)، تنمية بلورية طبقية بالحزمة الجُزَيئية | دقة الشكل (دقة قناع القالب)، دقة السماكة (مقاس مكروي) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | ربط تغلُّلي، صهر (ربط حراري) | تلبيد، تبشير، نتردة شاردية، تغطيس، طلاء مصهور | دقة الشكل (دقة القناع)، دقة السماكة والعمق (مقاس كبير) |
| | توضيع وربط فيزيائي (ديناميكي) | توضيع رذاذي، طلاء شاردي، تنمية بلّورات طبقية شاردية، ترسيب بحزمة الشوارد، مزج بحزمة الشوارد | دقة الشكل (دقة القناع)، دقة العمق (مقاس ميكروي) |
| | زرع شوارد (ديناميكي) | زرع شوارد (حقن) | دقة التحكم بتوضيع الشكل (دقة القناع)، دقة العمق (مقاس ميكروي) |
| | تبخير بالحقل الكهربائي | معالجة STM | |
| تغيير شكل بالثاقبة الذريّة | تدفق حراري | تسوية التوتر السطحي (حراري، ضوئي، ليزر، حزمة إلكترونية، غاز عالي الحرارة) | دقة الهيئة (مقاس كبير) (هيئة مشكلة قبْليا)، دقة العمق والشكل (دقة القالب) |
| | تدفّق لزج | تلميع بتدفق سائل (مائي)، قولبة بالحقن | دقة الهيئة (مقاس كبير) |
| | تدفق احتكاكي (قص انزلاقي) (صقل شاردي) | صقل ناعم بتدفق الجُسيْمات (حك بالمسح، صقل)، سك، دمغ عالي الضغط | دقة الشكل (دقة السك) |
| | تموضع جزيئي | | |
| معالجة السطوح | تنشيط حراري (إلكتروني، فوتوني، شاردي) | تقسية، تطرية (معدن، نصف ناقل)، تغطية بالزجاج، تصليد (راتنج) | مقاس كبير: تحكم حلقة مفتوحة في ظروف وحالات أداة المعالجة، أي الذرّة، أوجزيء الغاز أو السائل، أو الشاردة، أو الإلكترون، أو الفوتون... إلخ |

| | مزج، ترسيب (إلكتروني، فوتوني، شاردي، . .إلخ) | بالنشادر والخلط (شاردي) | |
|---|---|---|---|
| | تفعيل كيميائي (إلكترونية، فوتونية، شاردية. . . إلخ) | بلمرة، وإزالة البلمرة | |
| | تنشيط كيميائي معضّد بالطاقة إلكترونية، شاردة، شعاع فوتوني معضّد) | تفاعلية سطحية | مقاس صغير: تحكم حلقة مغلقة للجزء الميكروسكوبي بواسطة التحكم بالتغذية الاسترجاعية لحالة العمل. |
| | تنشيط بالعامل المساعد (الركيزة) | تنشيط التفاعل | |

EEM: تشغيل بالإصدار المرن؛ STM: مجهر المسح النفقي؛ AFM: مجهر القوة الذريّة.

وفي ما يخص المواد النانوية البازغة ذات الجُزَيئات الفائقة، ليس ثمة من نظيرات لها مألوفة، وخواصها المبتغاة هي خواص جديدة من حيث المبدأ. هنا على وجه الخصوص، ثمة إمكانات هائلة لتفصيل المواد بغية الحصول على خواص معينة.

وحتى لو كان ما توافره المواد النانوية ليس كثيراً بالقدر الكافي، فإنه يمكن تخيُّل تنوُّع واسع من البنى النانوية التي تُضَم فيها كينونات مختلفة وتُجمَّع بطريقة ما لتعطي بنية كبيرة، ذات خواص وظيفية، لا إنشائية على الأرجح، مرغوب فيها. ليس المقصود بهذا بنى من قبيل التجهيزات والنظم الكهروميكانيكية النانوية، التي تقف مع تلك البنى فعلاً على الأرضية المشتركة نفسها. بل إن فكرة تجميع بنية نانوية، باستخدام «أدوات» متنوعة لتحقيق تصميم معيّن، من مكوّنات يمكن أن تكون بحد ذاتها معقّدة وفائقة التصميم، توحي باستخدام مصطلح **البنى النانوية الوظيفية**. إن مفاهيم من قبيل تصميم المحاكيات الحيوية

ومبادئ المعالجة، إضافة إلى مبدأ التضافر، مع الفهم المطَّرد التزايد للتقانة الحيوية، ولأدواتها المتطورة بسرعة، يمكن أن تجد أعظم تطبيقات لها في هذه البنى النانوية الوظيفية، التي ربما تمثّل المستقبل الحقيقي لإيجاد مواد جديدة حقاً.

تُصنَّف البنى الميكرويّة الفائقة الصغر التي يقع مقاس حُبيْبتها الوسطي في مجال النانومتر ($10^{-9}$ متر) بأنها مواد نانوية البنية[12]. وحالياً، بالمعنى الواسع لهذا المصطلح، يمكن اعتبار أي مادة، تحتوي على حُبيْبات أو تجمعات أو شرائح تقل مقاساتها عن 100 نانومتر، مادة نانوية البنية[13]. إن ما يحفِّز الاهتمامَ بهذه المواد، في الحقيقة، هو أنه يتوقع منها أن تُبدي خواص ميكانيكية وضوئية وإلكترونية ومغنطيسية فريدة، وذلك بفضل الحجم الصغير للَبِنات بنائها (جُسيْم، حُبيْبة...) وما ينجم عنه من نسبة سطح إلى حجم كبيرة[14].

**تعتمد خواص المواد النانوية البنية على أربعة سمات عامة هي:**

**1** ـ المقاسات الحُبيْبية الدقيقة وتوزُّع المقاسات الضيِّق (< 100 نانومتر).

**2** ـ التركيب الكيميائي لأطوار مكوّناتها.

**3** ـ وجود الملتقيات (Interfaces)، أي الحدود بين الحُبيْبات، أو بين الأطوار المتباينة، أو وجود السطوح الحرة.

**4** ـ التأثيرات المتبادلة بين المكوِّنات.

إن وجود وتفاعل هذه السمات الأربع يحدِّد الخواص الفريدة للمواد النانوية البنية.

## تحضير المعادن ومتعدّدات المعادن

تُحضَّر المعادن ومتعدّدات المعادن باستخدام طرائق مائية أو لامائية. إن لمساحيق المعادن الناعمة تطبيقات في المواد الإلكترونية والمغنطيسية، والمتفجرات، ومحفِّزات التفاعلات الكيميائية، والمستحضرات الصيدلانية، وفي تعدين المسحوق[15]. يُجرى التحضير الكيميائي للمعادن ومتعدّدات المعادن بطريقتين هما **(1)** تفكيك مواد أولية عضوية معدنية، حرارياً أو بالأمواج فوق الصوتية، لاستخلاص العناصر أو الخلائط الموجودة فيها، و**(2)** إرجاع المواد الأولية غير العضوية أو العضوية المعدنية بواسطة عوامل إرجاع. وتُحضَّر العناقيد النانوية نصف الناقلة بوضع الجُسيْمات ضمن خلايا أولية (ميسلات) أو غرويات أو بوليمرات أو زجاجيات أو زيوليتات، أو بواسطة دمج العناقيد النانوية المتحكّم فيه.

وتُعرَّف متعدّدات المعادن بأنها محاليل تتكوّن من معدنين أو أكثر بنسب مختلفة. وتتّصف خواص متعدّدات المعادن بأنها فريدة[16]، أما طرائق الاصطناع الكيميائية العامة لصنعها فهي مشابهة جداً لتلك المستخدمة في تحضير المعادن المستقلة.

إلا أن الشائع هو أن متعدّدات المعادن تُحضَّر عادة بالتفاعلات الإرجاعية. على سبيل المثال، حضَّر بورو (Buhro) وزملاؤه[17] مساحيق نانوية البلّورات لـ TiAl، $TiAl_3$، NiAl، و$Ni_3Al$، وذلك بإرجاع الـ $TiCl_3$ أو $NiCl_2$ بواسطة $LiAlH_4$ في طين الميستيلين (Mesitylene)، ثم بتصليد الناتج حرارياً (< 550 مْ). وجرى تحضير متعدّدات معادن مختلفة أخرى من قبيل $TiB_2$، $Ni_2B$، WC-Co، Co-B، Fe-B، Ni-B، Pd-B بتفاعلات إرجاعية باستخدام $NaBH_4$ وسيطَ إرجاع، على مواد أولية لاعضوية من قبيل $TiCl_4$، $NiCl_2$ و$6H_2O$[17].

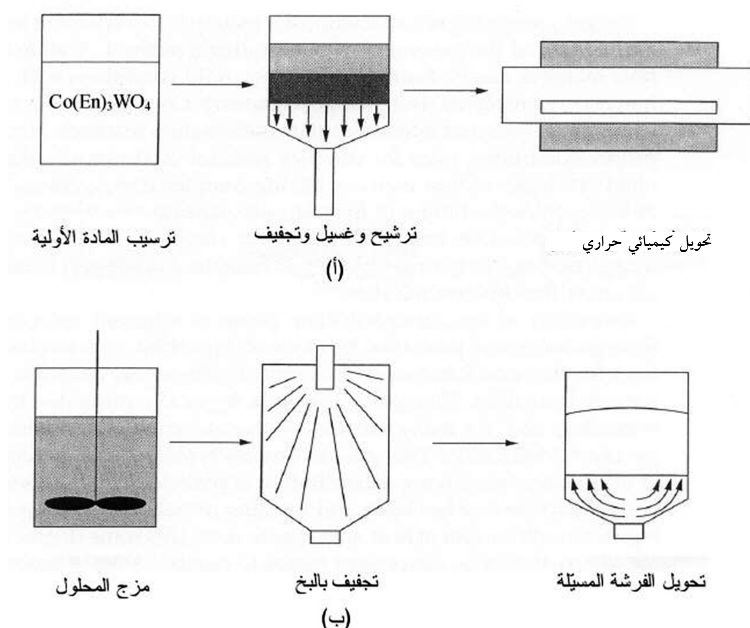
وثمة تقارير عن طريقة معالجة حرارية كيميائية لتحضير مساحيق ذات مساحة سطحية كبيرة انطلاقاً من مركَّبات أولية متجانسة. وقد طُبِّقت الطريقة بنجاح لتركيب مساحيق WC-Co نانوية الطور. تُعرف هذه الطريقة بـ «معالجة التحويل بالبخ» (Spray Conversion Processing)، وتتألف من ثلاث خطوات تسلسلية: **(1)** تحضير ومزج محاليل مائية من المركَّبات الأولية لتثبيت تركيب المحلول الابتدائي، **(2)** تجفيف المحلول الابتدائي بالبخ لتكوين مسحوق أولي متجانس كيميائياً، **(3)** ثم التحويل الحراري الكيميائي للمسحوق الأولي لتكوين المسحوق النهائي النانوي البنية المرغوب فيه (انظر الشكل 2 ـ 5).

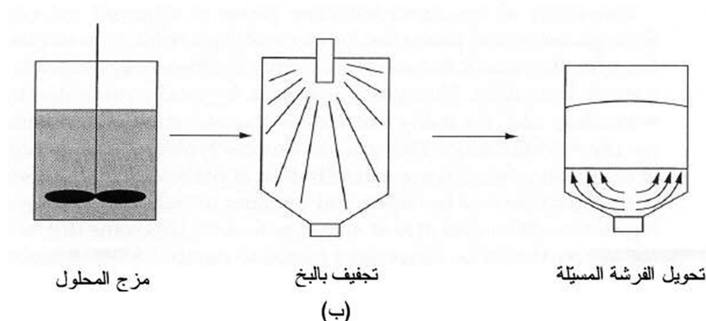
## طرائق تحويل المحلول إلى هُلام[19]

تُستخدم طرائق تحويل المحلول إلى هلام عموماً لتحضير مواد نانوية التركيب، لأن تلك التحويلات تحصل بسرعة مع تنوُّع كبير من المواد الأولية، ويمكن إجراؤها عند درجة حرارة الغرفة أو بالقرب منها. يضاف إلى ذلك أن المنتجات الهلامية كثيراً ما تمتلك خواص مثالية لبعض التطبيقات.

لقد استحوذ استخدام طريقة تحويل المحلول إلى هلام في إنتاج مواد نانوية التركيب على كثير من الاهتمام بسبب عمومية هذه الطريقة، فبواسطتها يُمكن تحضير كثير من حاضنات الجُزَيئات المضيفة المختلفة ضمن ظروف شديدة البساطة باستخدام كواشف رخيصة. إن تحويل المحلول إلى هلام باستخدام التحليل المائي وتفاعلات التكاثف في ما بين الجُزَيئات يحصل حينما تتوفَّر الظروف الملائمة، حتى في المزائج المتفاعلة المعقّدة، وهذا ما يوفِّر طريقة تركيب مناسبة لحاضنات مضيفة معقّدة. وهذه المرونة تمكِّن من ضبط

أبعاد المسامات، والمساحات السطحية، والكثافة، وثابت العزل الكهربائي، وقرينة الانكسار الضوئي، والتركيب الكيميائي للحاضنة المضيفة. ومن الممكن أيضاً صنع حاضنات عضوية ولاعضوية بهذه الطريقة، علماً بأن تحويل المحلول إلى هلام يحصل حتى ضمن الأيونات الغروية المعكوسة (Inverse Micelles).





**الشكل 2 ـ 5: مخطط توضيحي لـ (أ) سيرورة مخبرية، (ب) سيرورة صناعية للمعالجة الحرارية الكيميائية لمساحيق نانوية البنية، انطلاقاً من مزائج محاليل مائية**[18].

يتكوّن طور الجُسيْمات النانوية المنفصلة غالباً من خلال عمليات إرجاع للجُسيْمات العنصرية أو تفاعلات ترسيب للمواد الكيميائية. وثمة طرائق مختلفة لابتداء تكوين الجُسيْمات. وتعزِّز

المعالجة الحرارية نمو الجُسيْمات النانوية، لأن ثمة حاجة إلى الطاقة الحرارية لتشكيل البلّورات المنفردة في كثير من المواد. وتكوِّن طريقة التنمية هذه عادةً عناقيد نانوية في الطور المضيف ذات جُسيْمات مختلفة المقاسات. لقد مثَّل التحكم في مقاسات الجُسيْمات النانوية، وسيبقى، تحدياً في المعالجة بتحويل المحلول إلى هلام. صحيحٌ أن التحكم في مقاسات مسامات الحاضنة المضيفة يوفِّر بعض التحكم في حجم الجُسيْم النانوي، إلا أنه ما زالت ثمة حاجة إلى طرائق مناسبة لمعالجة المواد النانوية المركَّبة ذات توزُّع مقاسات الجُسيْمات الضيق. ومع أن الدرجة العالية من ضيق التوزُّع قد تكون غير ضرورية في بعض التطبيقات، إلا أنها مرغوب فيها جداً في معظم التطبيقات البصرية.

### الرَصّ

كانت أخيراً ثمة زيادة ملحوظة في الاهتمام بالمواد السيراميكية التي تُصنع من مسحوق فائق النعومة والتي تتألف من جُسيْمات أولية نانوية الحجم، يتراوح قطرها الوسطي بين 1 و100 نانومتر. تشير التوقّعات النظرية التي أجراها فرنكل[20] (Frenkel) وهيرينغ[21] (Herring) بوضوح إلى أن معدل تكثُّف المادة السيراميكية يتناسب عكسياً مع حجم الجُسيْم. لذا، بناء على هذا التوقّع، ومع انخفاض حجم الجُسيْم من المكرومترات إلى النانومترات، يمكن أن يُتوقَّع حصول تقلُّص كبير جداً في مدة صنع المسحوق عند حرارة معينة. وفعلاً، كثير من الاستقصاءات التجريبية يدعم هذا التوقّع النظري. على سبيل المثال، أنتج رودس[22] جُسيْمات زركون نانوية الحجم شديدة التراصّ، ولاحظ تكوُّن المسحوق من تلك المتراصَّات بكثافة قاربت الكثافة النظرية عند درجات حرارة أكثر انخفاضاً من تلك المستخدمة لتكوين مسحوق جُسيْمات الزركون الخشنة. وكوَّن

سكاندان[23] (Skandan) وزملاؤه أيضاً مسحوق تيتانيوم نانوي الجُسيْمات عند درجة حرارة تساوي 800 مْ، وهذه درجة أكثر انخفاضاً من درجة حرارة تكوين مسحوق التيتانيوم المعهودة.

توحي هذه النتائج بأن استخدام الجُسيْمات النانوية الحجم بوصفها مواد ابتدائية يمكن أن يوفِّر مزايا كبيرة لصنع المواد السيراميكية، خصوصاً لأن درجات حرارة تكوين المسحوق المخفَّضة، ومدده المقلَّصة، يمكن أن تمنع نمو الحُبيْبات غير المرغوب فيها، وهذا أحد أهم عوامل تشكيل البنى الميكرويّة لأنه يتعلق مباشرة بخواص المادة.

إن الدافع إلى تكثيف مساحيق الجُسيْمات النانوية قوي جداً بسبب أحجام جُسيْماتها الصغيرة. لكنْ في كثير من الحالات، تتطلب كثافاتها المنخفضة نسبياً، عندما تكون في الحالة الغضة الرطبة، مدداً أطول أو درجات حرارة أعلى من المتوقع للحصول على تكثيف تام للمسحوق. إن مدد تشكُّل المسحوق الطويلة ودرجات الحرارة العالية تؤدّي إلى نمو مفرط للحُبيْبات أو إلى نمو حُبيْبات غير منتظم، وهذا ما يؤدي إلى بنى ميكرويّة لا تتصف بالبنية الحُبيْبية النانوية المرغوب فيها.

## البنى النانوية القائمة على السليكون

يُعدُّ البحث عن تطبيقات البنى النانوية في التجهيزات والنظم عملية مستمرة. وبهذا الخصوص، يمكن تجزئة الدوافع إلى تصنيع تجهيزات نانوية البنية إلى ثلاثة جوانب: السرعة، والتنوع، والتكامل المتزايد. إن إحدى الفرص المهمة لتصنيع التجهيزات النانوية هي تصنيع تجهيزات إلكترونية تعمل في المجال الترددي من 100 جيغا هرتز حتى 1 تِرًا هرتز. وفي الإلكترونيات البصرية، يمكن صنع بُنى

في المجال دون الميكروي، حيث تصبح المفاعيل الكمومية شديدة الوضوح، من استقصاء خواص مواد جديدة باحتواء الإكسايتونات (Excitons) (أزواج الإلكترونات والثقوب) ضمن صندوق كمومي ثلاثي الأبعاد مع مستويات طاقة مميزة وما يقترن بها من حالات الانتقال البصرية التي تولِّد خطوط الإصدار المميزة. يضاف إلى ذلك، يمكن للمناطق الفاعلة النانوية الحجم في المكوّنات الإلكترونية أن تسمح بزيادة التكامل في الدارات ليصل إلى $10^{10}$ عنصراً في السنتيمتر المربع الواحد.

إن المعرفة الواسعة بالسليكون، إضافة إلى خطوط الإنتاج القائمة الخاصة به، تجعله أفضل مادة للاستخدام في التطبيقات المحتملة للبنى النانوية. لذا يجب فهم الجهود التي تُبذل في الإلكترونيات النانوية ضمن إطار الاحتياجات المستقبلية اللازمة لصناعة السليكون.

تؤدّي الحاجة إلى تجهيزات إلكترونية ميكرويّة أعلى سرعة وأشدّ تعقيداً إلى زيادة حتمية في تصغير التجهيزات، ومن ثمَّ، إلى كثافات عناصر أعلى ضمن الدارات المتكاملة. إن مقاسات المكوّنات حالياً تساوي نحو 250 نانومتر، ويُتوقع أن تتقلَّص بحلول عام 2007 حتى 70 نانومتر. إلا أن هذا التوجه يجلب معه مشكلة تصميمية، لأن كثافة أسلاك الألمنيوم التي تربط مكوِّنات الدارة المتكاملة بأرجلها تزداد كثيراً أيضاً، مؤدّيةً إلى ما يسمى «عنق الزجاجة السلكي». لذا فإن إحدى طرائق تجاوز هذه المشكلة هي استخدام التوصيلات الضوئية بدلاً من الكهربائية، في ما بين الدارات المتكاملة، وفي ما بين لوحات الدارات، لتحقيق وصلات فائقة السرعة. ثمة مجموعات بحث كثيرة في شتى أنحاء العالم تنظر في إمكان استخدام تقانة زرنيخ الغاليوم الهجينة على السليكون. لكن أحد البدائل هو استقصاء

وصلات ضوئية تقوم على تقانة السليكون. ثمة عدة مكوّنات ضوئية قائمة على السليكون وعلى أُكسيد السليكون موجودة فعلاً، من قبيل الكواشف الضوئية والأدلة الموجية. لكن من الناحية العملية، من الضروري النظر في تجهيزتين أساسيتين هما المشعّ الضوئي القائم على السليكون، والكاشف القائم على السليكون.

برغم فجوة نطاق الطاقة غير المباشرة في البنى القائمة على السليكون، فإن هذه البنى ما زالت في قيد الاستقصاء الكثيف بغية المكاملة المباشرة لثنائي مشعّ للضوء ضمن رقاقة. ثمة هندستان فراغيتان رئيستان يُنظر فيهما للتجهيزات الإلكتروبصرية المحتملة القائمة على السليكون: بنى عمودية من قبيل تجهيزات إصدار الضوء من الأعلى أو الأسفل الملائمة للوصل الضوئي في ما بين المستويات، وتجهيزات إصدار الضوء من الحافة، الملائمة للوصل الضوئي ضمن المستوى. وتقوم بعض الأفكار على أسلاك كمومية ونقاط كمومية مبنية جانبياً. إلا أن تصنيع تجهيزات وحيدة البعد أو تبدو صفرية الأبعاد لأغراض بحوث التجهيزات، المختلفة عن بحوث الفيزياء، تبقى تحدياً كبيراً بسبب مواصفات التجهيزات القاسية المتوقعة في المقام الأول[25].

وفي محاولات السعي لتحقيق تنوُّع في البنى النانوية باستخدام السليكون وأنصاف نواقل ذات صلة بالسليكون، يؤدّي التوجُّه نحو التصغير في الإلكترونيات الدور المهيمن. وهذا يضع، إلى حد ما، عبئاً ثقيلاً على التطويرات الأخرى التي يمكن أن تستخدم البنى النانوية في تطبيقات أخرى من قبيل الرؤوس النانوية.

إن الكم الكبير من الخبرة التقانية التي تحققت بفضل الجهود الجماعية في إلكترونيات السليكون تضمن لأي تطوُّر علمي ذي أهمية في هذا المجال، اجتاز اختبارات المواءمة الصناعية ومطابقة

المواصفات، أن يُصبح متاحاً للمستخدمين، لأن التوصيلات بين التجهيزة الداخلية والخارج متوافرة في منافذ الدخول والخروج الموجودة في الدارات القائمة على السليكون. يمكن للمُحِسَّات والتجهيزات الإلكتروبصرية الاستفادة من هذا النوع من التوصيلات، إلا أن ثمة تحديات كبيرة ما زالت موجودة، من هذه الناحية، في حالة الدارات الإلكترونية الكمومية النانوية، وسوف تُبقي العاملين في مجال الإلكترونيات النانوية القائمة على السليكون مشغولين جداً طوال السنين القادمة.

لقد اكتشف الباحثون في جامعة كاليفورنيا بسان دييغو(26) كيفية نقل خواص بلّورات السليكون البصرية إلى اللدائن. وهذا يمكن أن يؤدّي إلى تجهيزات طيّعة قابلة للزرع في الجسم وقادرة على مراقبة توزيع الدواء فيه، وعلى قياس الإجهادات في المفاصل الضعيفة، أو تتبُّع التئام الجروح المُخاطة.

صحيحٌ أن للسليكون كثيراً من المزايا، إلا أن له مثالبه أيضاً. فهو ليس متوافقاً حيوياً، وليس مرناً، ويمكن أن يتآكل بسهولة، في حين أن ثمة حاجة إلى شيء يمتلك جميع السمات الثلاث: التوافق الحيوي، والمطاوعة، وعدم التآكل لاستخدامه في التطبيقات الطبية.

يُعالج الباحثون ركيزة السليكون بالحفر الكهروكيميائي الذي يُعطي رقاقة سليكونية مسامية ذات صفيفة دقيقة من الثقوب النانومترية. وهذا يُكسِب الرقاقة خواص بصرية مشابهة لتلك التي للبلّورات الفوتونية، وهي بلّورات ذات بنية دورية تستطيع التحكّم في نقل الضوء تماماً كما يتحكم نصف الناقل في نقل الإلكترونات.

في هذه الطريقة، تُسكب مادة لدنة مصهورة أو منحلّة في مسامات الرقاقة الفوتونية السليكونية المنهاة، ثم يُحلُّ القالب المتمثِّل

بالرقاقة تاركاً وراءه «نسخة» مرنة ومتوافقة حيوياً عن الرقاقة السليكونية المسامية. من حيث الجوهر، هذه سيرورة مشابهة للسيرورة المستخدمة في صنع دمى لدنة بواسطة قالب. غير أن ما ينتج منها هو بنية نانوية مرنة متوافقة حيوياً لها خواص البلّورة الفوتونية. يستطيع العلماء بهذه الطريقة صنع بوليمرات تستجيب لأطوال موجات معيّنة تنفذ عميقاً ضمن الجسم.

### أنصاف النواقل الهجينة ـ الإلكترونيات النانوية الجُزَيئية

يمكن للدارات المتكاملة الفائقة الكثافة ذات الأشكال التي تقل أبعادها عن 10 نانومتر أن توفِّر مزايا هائلة لجميع تقانات المعلومات، ومنها الحوسبة والتشبيك ومعالجة الإشارة. إلا أن النتائج الحديثة تشير إلى أنه لا يمكن توسيع عالم الدارات العالية التكامل الحالي القائم على تقانة «السيموس» ليشتمل على تلك الدارات. والسبب الرئيس هو أن حساسية موسّطات ترانزستور المفعول الحقلي السليكوني، وأهمها عتبة جهد البوابة، للتغيرات العشوائية في حجم التجهيزة، التي لا مفر منها عند أطوال بوابة تقل عن 10 نانومتر، تزداد أسياً. وهذه الزيادة في الحساسية يمكن أن تجعل تكاليف التصنيع باهظة جداً، وهي سوف تؤدّي إلى نهاية قانون مور في وقت ما من العقد القادم[27].

إن البديل الرئيس لتلك التقانة، أي مفهوم التجهيزة النانوية، أو الإلكترونيات الإفرادية القائمة على التحكّم بحركات الإلكترونات إفرادياً ضمن البنى ذات الحالة الصلبة، يوفِّر بعض المزايا المحتملة مقارنة بتقانة السيموس، من قبيل وجود إمكانات أوسع لاختيار المواد. إلا أن الأبعاد الحرجة لترانزستور الإلكترون الواحد، الضرورية للعمل عند درجة حرارة الغرفة، يجب أن تكون أقل من 1

نانومتر، وهذا مقاس أصغر كثيراً مما تستطيع التعامل معه تقنيات الطباعة الضوئية الحالية، وحتى المستقبلية، لأن تلك التقنيات تقوم على الإشعاع فوق البنفسجي البعيد، وعلى الحزم الإلكترونية.

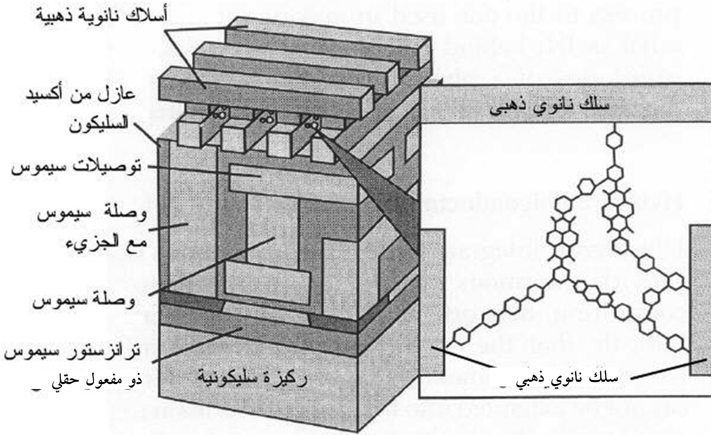
## الدارات الهجينة

يرى كثير من الفيزيائيين والمهندسين أن أزمة قانون مور الوشيكة لا يمكن أن تُحل إلا من خلال الانتقال الكلّي من تقانة السيموس الصرفة إلى دارات هجينة (Hybrid Circuits) جُزَيئية نصف ناقلة تسمّى السيمول (CMOL)، وهي تركيب من (CMOs-Molecular)، أي السيموس الجُزَيئي. يمكن لهذه الدارة أن تَجْمع (انظر الشكل 2 ـ 6):

- مستوى من تجهيزات السيموس المصنّعة بالتشكيل بالطباعة الضوئية.
- بضع طبقات من صفيفات الأسلاك النانوية المتوازية المُشكَّلة، مثلاً، بالطباعة النانوية.
- مستوى من التجهيزات الجُزَيئية التي تتجمع ذاتياً على الأسلاك النانوية ابتداءً من محلول.

يجمع مفهوم السيمول مزايا المكوِّنات النانوية الحجم، من قبيل وثوقية دارات السيموس وضآلة التجهيزات الجُزَيئية، إلى مزايا تقنيات صنع الأشكال الشديدة الضآلة التي تضم مرونة التشكيل بالطباعة الضوئية المعهودة والتكلفة المنخفضة المحتملة للطباعة النانوية والتجميع الذاتي الموجَّه كيميائياً. إن هذا التركيب يمكِّن من تحقيق دارات سيمول ذات كثافة لا تُضاهى، أي ما يصل إلى $3 \times 10^{12}$ وظيفة

في السنتيمتر المربع، بتكلفة تصنيع مقبولة. تُعتبَر هذه التجهيزات الوحيدة الإلكترون المرشّح الرئيس للمكوِّنات الوحيدة الجُزَيء، لأن آلية تشغيلها لا تتطلب ناقلية كهربائية عالية بين التجهيزة ومنافذها، وذلك خلافاً لترانزستورات المفعول الحقلي. يُضاف إلى ذلك أن طبقة السيموس تسمح لدارات السيمول بتجاوز واحدة من أهم السيئات الجليّة في الترانزستورات الوحيدة الإلكترون، وهي التكبير المنخفض للجهد الكهربائي فيها.

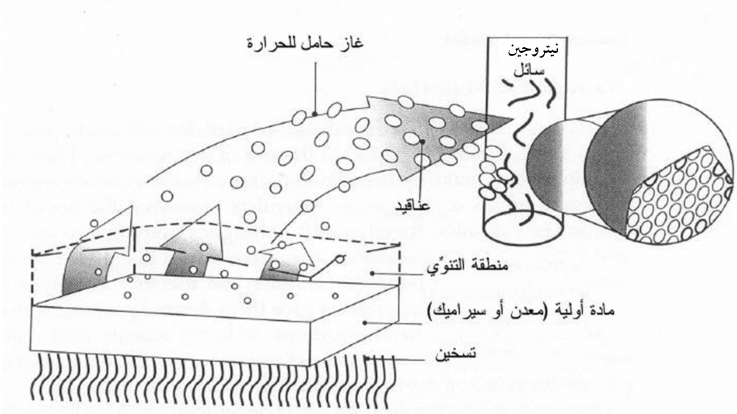



**الشكل 2 ـ 6: تحتوي دارة السيموس والجزيء هذه على جزيء يمكن أن يعمل كعنصر ذاكرة يجري التحكم فيه بإشارتي دخل**[27][28].

تعمل مجموعة لدى جامعة نيويورك، في ستوني بروك[27][28]، على تطوير وتنفيذ عدة جُزَيئات ملائمة لهذا الغرض، وأحد أمثلتها مبيّن في الشكل 2 ـ 6. إن هذا الترتيب يضم، من حيث الجوهر، تجهيزتين مشهورتين وحيدَتي الإلكترون هما الترانزستور وفخ الإلكترونات.

## المواد النانوية الطور

تتكوَّن المواد النانوية الطور من جُسيْمات مقاساتها أصغر من 50 نانومتر، أو أصغر بعشرة آلاف مرة من النقطة التي في نهاية هذه الجملة. أما لبِنات البناء الأساسية التي تتكوَّن هذه المواد منها فهي عناقيد يحتوي كل منها على بضعة آلاف من الذرّات فقط. يُعدُّ علماء مختبرات أرغون الوطنية (National Laboratory Argonne) رواد تطوير السيراميك النانوي الطور. فبالتعاون مع زملاء لهم في الجامعات والصناعة والمختبرات الأميركية الأخرى، حدَّدوا خواص وخصائص كل من السيراميك والمعادن النانوية الطور[29]. ويستطيع هؤلاء العلماء اليوم هندسة مواد نانوية الطور لإكسابها خواص معيّنة تحقِّق متطلبات تطبيقات محدَّدة. إن الصناعة تستخدم فعلاً مواد أبعادها نانومترية في تطبيقات تقانية متقدمة، ومن أمثلة ذلك أن التجهيزات نصف الناقلة تُبنى طبقة ذريّة تلو أخرى.




**الشكل 2 ـ 7: تكوين جُسيْمات نانوية الطور بتكثيف الغاز[29]**

ويتضمن أحد التطبيقات المثيرة الجديدة التي يجري تطويرها تصنيع آلات ضئيلة تُشكَّل بحفر بلّورات مفردة من السليكون أو من مواد أخرى. إلا أن العلماء مستمرّون في البحث عن طرائق إضافية لتحسين هذه التقانة، فالتركيب والمعالجة في المجال النانوي يمكن أن يجعلا كثيراً من التطورات التقانية المتنوعة ممكناً.

تُجمَّع المواد النانوية الطور صناعياً في المختبرات، حيث تكدّس الذرّات والجُزَيئات في عناقيد، وتُجمَّع بعدئذٍ تلك العناقيد لتعطي مواد نانوية الطور. إن مرونة تصميم المواد الناتجة وخواصها الفريدة هي ما يجعل المواد النانوية الطور مُغرية للتطبيقات المستقبلية ذات المتطلبات القاسية. وخلافاً لما هو شائع لدى الصناعة اليوم، يمكن للمواد النانوية الطور أن تُصنع كمياً وبسرعة، لا طبقة ذريّة تلو أخرى.

## إنتاج الجُسيْمات النانوية الطور

تُصنع الجُسيْمات النانوية الطور بسيرورة تكثيف غازية يُبخَّر فيها معدن أو سيراميك، وتُكثَّف الجُسيْمات من البخار وتُصلَّد لتُنتج صيغة جديدة. تعيد هذه السلسلة تكوين المعدن أو السيراميك من شكله الخشن المعتاد وتحوِّله إلى مسحوق شديد النعومة يتألف من تجمّعات ذريّة أو جُسيْمات نانومترية المقاس. ثم يُضغط المسحوق ليكوِّن جسماً صلباً بالشكل والحجم المرغوب فيهما ضمن حجرة كتيمة وفي جو فائق النظافة.

تبدأ السيرورة بمادة سيراميكية أو معدنية عادية. مثلاً، إذا كان الهدف هو إنتاج نحاس نانوي الطور، كان مصدر الذرّات قِطَعاً من النحاس المألوف. تُسخَّن المادة عادة إلى درجة حرارة أعلى بقليل من درجة انصهارها، وهذا ما يجعل الذرّات الساخنة تغادر سطح المادة المصدر مولدةً بخاراً (انظر الشكل 2 ـ 7).

وعندما تلتقي هذه الذرّات بذرّات غاز أبرد في حجرة الإنتاج، تبرد وتتكاثف لتكوِّن مادة صلبة (يُستخدم للتبريد غاز الهيليوم لأنه خامل ولا يسبب تفاعلاً كيميائياً يغيّر المعدن). إن هذا التكاثف مشابه لتكاثف بخار إبريق الشاي الذي يلتقي بهواء الغرفة البارد ويتكاثف ليشكل قطيرات مائية.

تتوضَّع العناقيد الذريّة الناتجة في الحجرة على سطح أنبوب مجوف مبرّد بالآزوت السائل عند درجة حرارة 77 كلفن. يجذب الأنبوب المبرَّد العناقيد الساخنة تلقائياً، واحداً تلو آخر، بسيرورة تسمّى التهجير الحراري (Thermophoresis). ثم يُزال المسحوق الفائق النعومة المتجمّع على الأنبوب بوجود تخلية تامة تضمن نقاء المادة. ثم يُكبس المسحوق ليعطي جسماً له الشكل والحجم المطلوبين. تعمل هذه السيرورة بنجاح مع كل من السيراميك والمعادن. وتصبح المواد السيراميكية النانوية الطور المُنتَجة بهذه الطريقة أسهل تشغيلاً، من دون شقوق أو كسور.

يمكن إنتاج مسحوق السيراميك النانوي الطور عند درجات حرارة أقل بنحو 600 درجة مئوية من تلك اللازمة لمساحيق السيراميك التي هي أخشن. يُضاف إلى ذلك أن التقلُّص في أثناء تلبيد المسحوق النانوي يكون صغيراً جداً، وهذا ما يجعل الأجسام النانوية الطور لا تحتاج إلا إلى قليل من التشغيل للوصول إلى أشكالها النهائية.

وتُبدي المواد النانوية الطور علاقة مباشرة بين مقاس الحُبيْبة وخواصها. حين إنتاج النحاس النانوي الطور بسيرورة التكثيف الغازي، يكون أقوى بما يصل إلى خمس مرات من النحاس المألوف ذي الحُبيْبات الخشنة. وهذا ينطبق أيضاً على المعادن الأخرى.

وتتحسَّن أيضاً مطاوعة المواد السيراميكية النانوية الطور، من قبيل ثاني أُكسيد التيتانيوم وأُكسيد الزنك، تحسَّناً هائلاً. فبنيتها الحُبيْبية الناعمة تسمح للحُبيْبات بالتحرك كلٍّ على حدة، واحدة فوق أخرى، من دون أن ينكسر السيراميك.

### حدود الحُبيْبات ومقاساتها

نظراً إلى أن المواد النانوية الطور تُشكَّل بدمج عدد كبير من العناقيد أو الحُبيْبات الصغيرة، فإن الملتقيات بين الحُبيْبات، والتي تسمّى حدود الحُبيْبات، على درجة من الأهمية في تحديد خواص تلك المواد والتحكم فيها[29].

ونظراً إلى أن مقاسات الحُبيْبات النانوية الطور ليست أكبر من 50 نانومتر عادة، فإن الآلية التي تتحكم في الخواص الميكانيكية والمغنطيسية والبصرية وغيرها في المواد العادية يمكن أن تتغيّر تغيراً كبيراً عندما تصبح مقاسات الحُبيْبات أصغر من تلك القيمة. مثلاً، يمكن تغيير أشكال المعادن النقية ببساطة لأن الذرّات تستطيع الحركة بسهولة ضمن بنية شبكة المعدن البلّورية. ويتحقَّق هذا النوع من الحركة الذريّة من خلال حركة عيوب الشبكة المسماة الانزياحات عبر البنية. لكنْ عندما يُصنع معدن من جُسيْمات نانوية الطور، فإن حدود الحُبيْبات تعوّق حركة الانزياح، ويجعل حجمُ الحُبيْبة الصغير حدوثَ الانزياح صعباً. حينئذٍ، ثمة حاجة إلى قوى أكبر لتغيير شكل المادة، ولذا يصبح المعدن أقسى وأقوى.

وفي المستوى المكرُويّ، تستطيع حُبيْبات السيراميك النانوية الطور على ما يبدو الحركة بسهولة، واحدة فوق أخرى، بسبب حجم الحُبيبة الفائق الصغر. لذا فإن المواد السيراميكية النانوية الطور أكثر قابلية لتغيير شكلها وأقل هشاشة من المواد السيراميكية العادية.

في الخزفيات العادية، لا تنزلق الحبيبات بسهولة، ولذا تكون المادة هشة. إن تلك الهشاشة المتأصلة في المواد الخزفية العادية هي سبب عدم استخدامها على نطاق واسع في تطبيقات من قبيل مكوّنات المحرّكات.

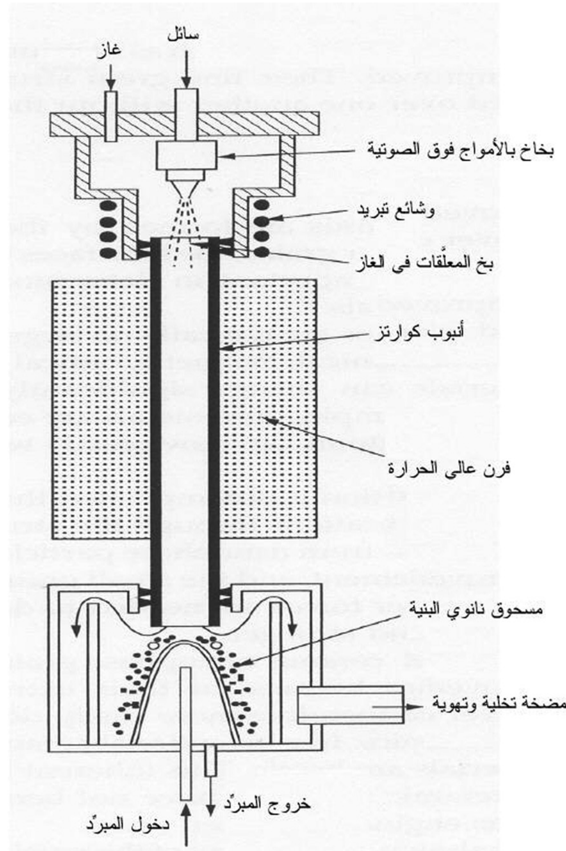
وبيَّنت الأبحاث أيضاً أنه يمكن التحكم بمقاس الجُزَيئات في أثناء الإنتاج للحصول على خاصية معيّنة مرغوب فيها. وبتكييف حجم وتركيب عنقود ذرّي ثلاثي الأبعاد، يمكن التحكم في خاصيّة معيّنة من أجل تطبيق معيّن، ويمكن ضبط مجموعة من الخواص المتنوعة ضمن المادة النانوية الطور نفسها.

## الأكاسيد النانوية البنية[30]

يمكن تحضير الأكاسيد النانوية البنية بتحويل محاليل أملاح المعادن إلى هباب وتحميل الهباب على غاز حامل. ويحمل تيار الغاز قُطَيرات الهباب إلى مفاعل ذي جدران حارة، حيث يتبخّر المَذيب وتتفاعل الأملاح الأولية لتعطي المُنتَج المطلوب. ويُفصل المسحوق الناتج من الغاز الحامل بالترشيح أو الرص، أو في السايكلون. يبيّن الشكل 2 ـ 8 رسماً توضيحياً لنظام معالجة بالتحويل الحراري إلى هباب. في مثل هذا النظام، تزداد حرارة القُطَيرات ويبدأ المحلول بالتبخّر مع تدفق القُطَيرات عبر الحيّز الحار من المفاعل. وتتناقص أحجام القُطَيرات ويترسّب المزيج الملحي مكوِّناً جُسيْمات من الملح الجاف.

عند درجات حرارة أعلى مما يلزم، تخضع الأملاح إلى تفاعلات تفكيك حراري، فتتحوَّل إلى غاز وتتشكّل جُسيْمات أكسيد

مسامية غير متبلورة. وعند درجات حرارة أعلى من ذلك، يتحول الأُكسيد اللامتبلور إلى مادة مسامية نانوية البلّورات. إن محرِّض التحويل هنا هو تناقص الحيّز الفارغ المقترن بطور البلّورة النانوية. أما التسخين إلى درجات فوق ذلك فيسبب تكثّفاً وتلبيداً ونمو حُبَيْبات غير مرغوب فيها. لذا يجب التحكّم بعناية في مدة إقامة الجُسيْم في المفاعل، وفي توزُّع الحرارة ضمنه، بغية «تجميد» البنية النانوية في الوقت المناسب.




**الشكل 2 ـ 8: مخطط توضيحي لنظام التحويل الحراري[31].**

لقد جرى تحضير مساحيق نانوية بطريقة الهباب[30]، ومنها أُكسيد الفاناديوم ($V_2O_5$)، وأُكسيد البالاديوم (PdO)، ومسحوق نحاسات الإيتريوم والباريوم ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$) الفائق الناقلية الكهربائية.

وخلافاً لطريقة صنع الأكاسيد النانوية البنية هذه، استخدم باحثون آخرون طريقة تقوم على المحلول تعطي، من خلال هلام، مسحوق ثاني أُكسيد التيتانيوم $TiO_2$ مشوباً بالقصدير. إن الإشابة بالقصدير تُثبِّت طور الروتيل (Rutile) المطلوب في ثاني أُكسيد التيتانيوم.

## النيتريدات ونيتريدات الكربون النانوية البنية

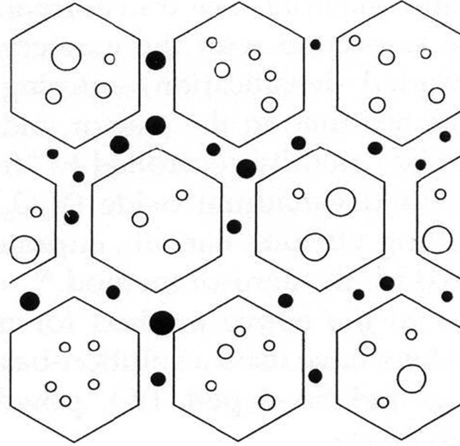
يُعدُّ نيتريد السليكون ($Si_3N_4$) مادة سيراميكية مهمة للاستخدام في التطبيقات العالية الحرارة والشديدة الإجهاد، من قبيل قطع المحرّكات الحرارية، ورؤوس أدوات القطع، ومختلف أنواع المحامل. في هذه التطبيقات، يجب أن تكون مقاسات جُسيْمات المساحيق المثالية، التي تكثَّف بالكبس الساخن، أصغر من 1 ميكرون. ويجب أن تكون الجُسيْمات متساوية الأطوال المحورية تقريباً، وأن يكون لها توزُّع مقاسات ضيِّق. ويجب أيضاً ألا تكون متكتلة، وأن تكون شديدة النقاوة. ويمكن إنتاج مسحوق الـ $Si_3N_4$ الذي يحقق هذه المتطلبات باستخدام سيرورة الطور الغازي المحرَّض بليزر ثاني أُكسيد الكربون[30]. في هذه الطريقة، تتقاطع حزمة من غاز السيلان (Silane) ($SiH_4$) والأمونيا ($NH_3$) مع حزمة ليزرية، فتولِّدان لهباً بلازمياً. وتتجمَّع الأجناس الذريّة المتولِّدة في البلازما لتشكِّل جُسيْمات $Si_3N_4$ لها قطر وسطي يساوي 17 نانومتر. ويُفصل المسحوق الناتج بالترشيح.

# المواد المركَّبة النانوية

## نظرة تمهيدية

تتكوَّن البنية الميكرُويّة العامة للمادة النانوية المركَّبة، المبينة في الشكل 2 ـ 9، من جُسيْمات دقيقة جداً (أصغر من 300 نانومتر) موزَّعة ضمن حُبيْبات حاضنة المادة التي هي أكبر منها (1 ـ 5 ميكرون). وتوجد الجُسيْمات النانوية ضمن الحُبيْبات، وعلى حدود الحبيبات.

لقد جرى تطوير عدة طرائق عملية لتصنيع هذه البنى، ومنها استخدام طريقة توضيع الأبخرة كيميائياً لإنتاج مسحوق غير متبلور يمكن منه بلورة البنية الميكرويّة المطلوبة. وقد استُخدمت بوليمرات أولية بطريقة مشابهة لتشكيل أجسام غير متبلورة.



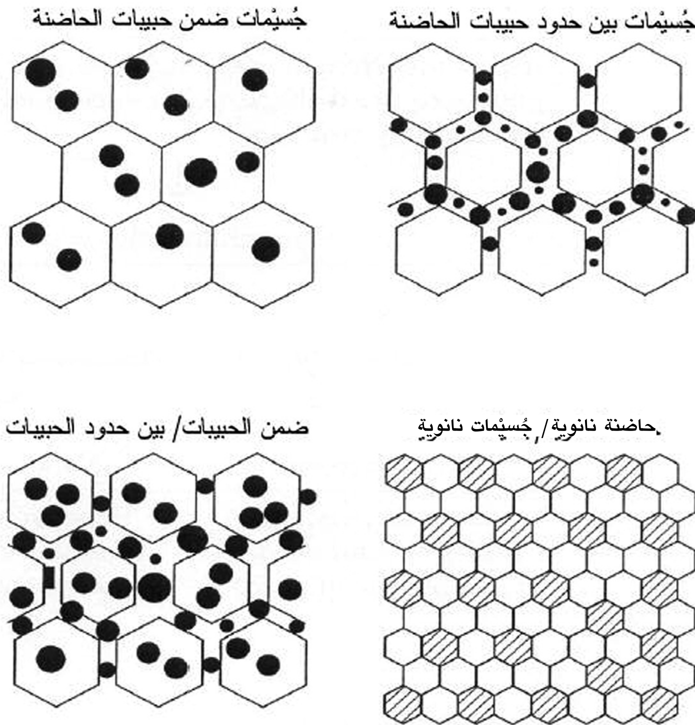
**الشكل 2 ـ 9: رسم توضيحي لبنية مادة مركَّبة نانوية.**

توفِّر كلتا الطريقتين مزايا المعالجة النظيفة وانتشار الجُسيْمات النانوية المتجانس عبر حُبيْبات الحاضنة. أما عيوبهما فهي أنهما باهظتا التكلفة، وأنهما ليستا سهلتي التطبيق لتصنيع مكوِّنات سيراميكية كبيرة. من ناحية أخرى، يوفِّر المزج البسيط لمساحيق شديدة النعومة بطريقة الطحن العادية تقنية بسيطة ورخيصة لتصنيع المواد المركَّبة النانوية. وهذه السيرورة قابلة للتوسيع بسهولة نسبياً أيضاً لاستخدامها في التطبيقات الصناعية.

جرى تصنيع عدة نظم من المواد المركَّبة النانوية بنجاح هي $Al_2O_3/SiC$، $Al_2O_3/Si_3N_4$، $Al_2O_3/TiC$، mullite/SiC، MgO/SiC، $Si_3N_4/TiN$، $Si_3N_4/SiC$، حيث يمثّل المركَّب الأول في كل منها مادة الحاضنة. وقد تغيَّرت نسبة المكوِّن النانوي الطور من 1 حتى 50 في المئة ح.

يبين الشكل 2 ـ 10 أربعة أنواع من بنى المواد المركَّبة النانوية التي يمكن اعتبارها بنى تستطيع تحسين الخصائص الميكانيكية المختلفة تحسيناً كبيراً، وتُضيف إلى المواد السيراميكية وظائف جديدة. تُعدُّ المواد المركَّبة النانوية ذات الجُسيْمات الموجودة ضمن حُبيْبة الحاضنة، وتلك ذات الجُسيْمات بين حُبيْبات الحاضنة، وتلك النانوية الحاضنة/ النانوية الجُسيْمات ثلاثة أنواع جديدة من المواد المركَّبة التي يمكن تصنيعها بتلبيد المسحوق. أكثر من هذا، يمكن النظر أيضاً في تحقيق بنية مكوَّنة من جُسيْمات ضمن حُبيْبات الحاضنة وبين حُبيْبات الحاضنة في الوقت نفسه. من وجهة نظر ميكانيك الكسر الخطي ونظرية تصميم المواد المعدنية، تمتلك المواد المركَّبة النانوية ذات الجُسيْمات التي ضمن الحُبيْبة أفضل بنية لتكون مادة إنشائية. بتحقيق هذه البنية عملياً، سوف يكون من الممكن زيادة قوة المادة بنحو 2 إلى 5 مرات، على سبيل المثال، ورفع حدود درجات الحرارة بنحو 400 حتى 700 مْ. إلا أنه لا يمكن توقّع زيادة

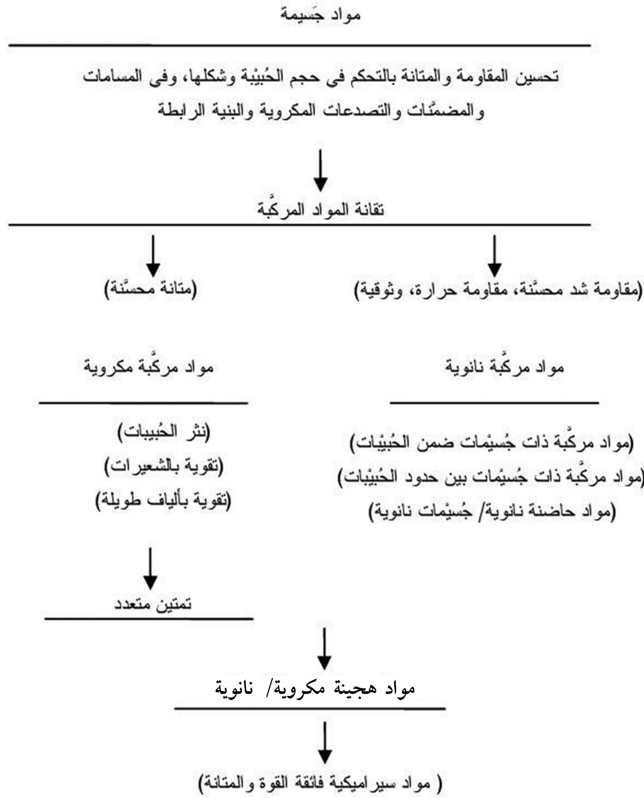
حادة في مقاومة الكسر. بغية الوصول إلى مواد سيراميكية فائقة القوة والمتانة سوف يكون من الضروري في النهاية جمع مواد مركَّبة ميكرويّة إلى مواد مركَّبة نانوية. من المواد الميكرويّة النانوية الهجينة المواد المركَّبة النانوية المقواة بالشعيرات والحُبيْبات الصفيحية والخرزات الطويلة (انظر الشكل 2 ـ 11).




**الشكل 2 ـ 10**: **أنواع المواد المركَّبة النانوية.**

كتب ناوا (Nawa) وسيكينو (Sekino) ونييهارا (Niihara) مقالة[34] عن تصنيع نوعين من المواد المركَّبة $Al_2O_3/Mo$ بالكبس الحار لمزيج من مسحوق $\gamma$ أو $Al_2O_3$ ومسحوق الموليبدن ناعمة. من أجل المادة $Al_2O_3$-5% Mo (نسبة حجمية) التي تستخدم -$\gamma$ $Al_2O_3$ مسحوقاً ابتدائياً، لوحظ أن طبقات الموليبدن المستطيلة تحيط بجزء من حُبيْبات الـ $Al_2O_3$، وأدى هذا إلى قيمة كبيرة في ممانعة الكسر (متانة إزاء الكسر: 1.7 ميغا باسكال م). وفي النظام الذي يستخدم $Al_2O_3$ مسحوقاً ابتدائياً، نُثرتْ جُسيْمات الموليبدن النانوية المقاس ضمن حُبيْبات الـ $Al_2O_3$ وعلى حدودها. وبذلك جرى تأكيد نجاح صُنع مادة مركَّبة نانوية من السيراميك والمعدن في النظام $Al_2O_3/Mo$. ومع زيادة نسبة الموليبدن، تشكَّلت جُسيْمات الموليبدن المستطيلة على حدود حُبيْبات الـ $Al_2O_3$. لقد لوحظت تحسينات كبيرة في الخواص الميكانيكية الناتجة، حيث أصبحت قيمة القساوة 19.2 جيغا باسكال، وأصبحت مقاومة الكسر 884 ميغا باسكال، وأصبحت المتانة 7.6 ميغا باسكال م، في مواد مركَّبة تحتوي على نسب حجمية تساوي 5 و7.5 و20 في المئة من الموليبدن، على التتالي. تساوي قيمة مقاومة الكسر الناتجة 1.5 ضعفاً من تلك التي للـ $Al_2O_3$ الجَسِيم، وتساوي المتانة الناتجة 1.8 ضعفاً من تلك التي للألومينا الجَسِيمة.

وقام رَوْسِّت[35] (Rousset) بإنتاج مساحيق مركَّبة معدنية $(Fe, Cr, Fe_{0.8}Cr_{0.2})/Al_2O_3$ تحوي من 2 حتى 20 في المئة ومن الطور المعدني، وذلك بالإرجاع الانتقائي لمحاليل صلبة للأكاسيد وبالكبس الحار.




**الشكل 2 ـ 11: مفهوم تطوير المواد السيراميكية الإنشائية العالية الجودة.**

تعتمد البنية الميكرويّة للمواد المركَّبة الناتجة كثيراً على الخصائص الشكلية والبنيوية الميكرويّة للأُكسيد الابتدائي. وقد كانت مقاسات معظم الجُسيْمات المعدنية تقل عن 10 نانومتر، وكانت الجُسيْمات منتشرة ضمن حُبيْبات الحاضنة.

وجرى تحضير مركَّبات ذات كتل كبيرة بالكبس الحار، وقد وُجد أن لها خواص ميكانيكية تفوق كثيراً تلك التي للألومينا وللمواد

المركَّبة المعدنية السيراميكية الميكرويّة، إضافة إلى مقاومة جيّدة للأكسدة في الهواء عند درجات حرارة تصل إلى 1000 مْ.

واحتوت تلك المواد على جُسيْمات معدنية ضمن الحُبيْبات (مقاساتها أصغر من 30 نانومتر) وأخرى بين الحُبيْبات (مقاساتها أصغر من 1 ميكرون). وكانت الجُسيْمات الأولى مسؤولة عن التقوية الميكانيكية الشديدة التي لوحظت في حالة المحتوى المعدني المنخفض، في حين أن تقوية إضافية نجمت عن الجُسيْمات الأخرى.

وحضَّر تشين (Chen) وغوتو (Goto) وهيراي[36] (Hirai) مساحيق مركَّبة نانوية $SiC/Si_3N_4$ بتوضيع الأبخرة كيميائياً باستخدام $SiH_4$ و$CH_4$ و$WF_6$ و$H_2$ غازاتٍ مصدرية عند درجة حرارة تفاعل تساوي 1400 مْ.

تألفت المساحيق التي جرى تحضيرها من جُسيْمات مركَّبة $SiC/W_2C$ و$\beta$-$SiC_p$ جوفاء. وكان للجُسيْمات المركَّبة $SiC/W_2C$ نواة من الـ $W_2C$ وقوقعة من الـ SiC. وازدادت الأقطار الوسطية للمادة $SiC/W_2C$ من 18 حتى 30 نانومتر، وللمادة $SiC_p$ الجوفاء من 40 حتى 70 نانومتر، مع زيادة في تركيز الـ $SiH_4$.

كان الغرض من هذا العمل هو استقصاء انتشار طور دقيق من $W_2C$ وWC في أجسام من الـ SiC، التي أُثبت أنها كانت فاعلة في تحسين المتانة والخواص الكهربائية.

وحضَّر هِلِّلْ (Hillel) وزملاؤه[37] المواد المركَّبة النانوية $SiC/TiC/C$ بتوضيع الأبخرة كيميائياً على ركيزة غرافيتية عند ضغط يساوي الضغط الجوي ودرجة حرارة بين 950 و1150 مْ، مستخدمين منظومة الغاز $TiCl_4$-$C_4H_{10}$-$SiH_2Cl_2$-$H_2$.

وبيَّنت تقنيات توصيف مختلفة أن المواد المرسَّبة عند 1150 مْ

اتصفت ببنية ميكرويّة شديدة التنسُّج (220) الذي انخفض مع زيادة حرارة الترسيب. وأجرى زهاوت[38] (Zhaoet) وآخرون دراسة لتقييم الخواص الميكانيكية للـ $Al_2O_3$ والـ $Al_2O_3$ المحتوي على نسبة حجمية مقدارها 5 في المئة من الـ $SiC_p$ ذي الـ 0,15 ميكرون، ومن ضمنها عيّنات أُخضعت لمعالجة تطرية. واستنتجوا منها أنه من الممكن الحصول على مواد مركَّبة من الـ $Al_2O_3/SiC$ ذات مقاومة كبيرة:

**1** ـ يُعتقد أن التقوية والتمتين اللذين لوحظا في العينات ينجمان حصرياً تقريباً عن الإجهادات السطحية الضاغطة التي تسببها عملية الطحن. أما إضافة الـ $SiC_p$ فلا تؤثر في متانة المادة المتأصلة فيها.

**2** ـ تنطوي تطرية العينات المركَّبة على مفعول مضاعف من حيث القضاء على الإجهادات السطحية الضاغطة والقضاء أيضاً على العيوب السطحية.

**3** ـ تعزِّز الدراسة الحاجة إلى النظر في جميع الجوانب ذات الصلة بالكسر، ومنها المتانة ومقاومة الشد وتوزُّعات العيوب المتأصلة، قبل القيام بأي استنتاجات بخصوص آلية المقاومة التي جرت ملاحظتها[39][44].

ونُثرت جُسيْمات نانوية المقاس من متعدّد المعادن $Ti_2Ni$ في حاضنة TiNi منتظمة، وذلك بالتصليد السريع لخلائط TiNi شبه متساوية النسب الذريّة تحتوي على مقدار صغير من الـ Si، اعتماداً على مبدأ التنافس الحركي في السائل البالغ التبريد، وفق رأي ناغاراجان (Nagarajan) وتشاتّوبادياي[45] (Chattopadhyay).

وحضَّر ليو[46] (Liu) مواد مركَّبة من الـ C-C/SiC ذات حاضنة نانوية بطرائق تسريب البخار كيميائياً (Chemical Vapor Infiltration) (CVI). وقد كان هدف الباحثين تحضير مواد C-C/SiC نانوية

الحاضنة، لا مواد مركَّبة نانوية، بتقنية تسريب البخار كيميائياً من خلال عملية الترسيب المشترك.

استخدم ليو وزميله في تجربتهما السائل $CH_3SiCl_3$ والغاز $C_2H_2$ مصدراً، واستخدما الغازين $H_2$ و$N_2$ ليكون الأول حاملاً والثاني مُمدِّداً. واختيرت درجة حرارة الترسيب لتكون 1100 مْ، وكان الضغط الكلّي 1000 باسكال، وحُمِل الـ $CH_3SiCl_3$ إلى الفرن عبر ضخّ غاز الهيدروجين.

استنتج الباحثان أن تسريب البخار كيميائياً كان تقنية فعّالة لتصنيع مواد مركَّبة ذات حاضنة نانوية بعملية الترسيب المشترك باستخدام تفاعلات غازية متعدّدة المكوّنات. لقد تألَّفت البنية البصرية لحاضنة الـ C/SiC النانوية من عدة شرائح مختلفة السطوع تحت الضوء المُستقطَب. أخيراً، زاد وجود الـ SiC في حاضنة الكربون الحراري كثيراً من مقاومة الأكسدة في مواد الـ C-C/SiC، لأن الـ SiC يمكن أن يعمل مانع أكسدة.

تُعتبر طرائق تلبيد المسحوق أكثر الطرائق وعداً لتصنيع المواد المركَّبة النانوية السيراميكية، وفق رأي نييهارا وناكاهيرا[40]. فقد جرى تحضير مواد مركَّبة نانوية قائمة على السيراميك بتقنيات تعدين المسحوق (Powder Metallurgy) (P/M) المعهودة باستخدام سيرورات تلبيد مسحوق من قبيل التلبيد العديم الضغط، والكبس الحار، والكبس الحار المتساوي الضغط (Hot Isostatic Pressing) (HIP) للمنظومات $Al_2O_3/SiC$، $Al_2O_3/Si_3N_4$، $Al_2O_3/TiC$، $Y_2O_3/SiC$، MgO/SiC، Mullite/SiC، $B_4C/SiC$، $B_4C/TiB_2$، $Si_3N_4/SiC$، وSiC/SiC غير متبلور. وقد حُضِّرت المواد المركَّبة النانوية $Si_3N_4/SiC$ بتقانة تلبيد الطور السائل التي طُوِّرت للمواد السيراميكية $Si_3N_4$ الجَسِيمة، في حين استُخدم تلبيد المسحوق في الحالة الصلبة لتحضير المنظومات الأخرى. وحُضِّرت المواد النانوية Mullite/SiC

بالتلبيد التفاعلي العديم الضغط لمزائج مساحيق الـ $kaolin-Al_2O_3-SiC$ الطبيعية.

وفي منظومة السيراميك/ معدن، حُضِّرت بنجاح المواد المركَّبة النانوية: معدن مبعثر ضمن $Al_2O_3$ بتلبيد الـ $Al_2O_3$ مع مزائج مساحيق معدنية ناعمة وبإرجاع وتلبيد الـ $Al_2O_3$ مع مزائج أكاسيد معدنية. يبيّن الجدول 2 ـ 2 الخواص الناتجة للمواد المذكورة.

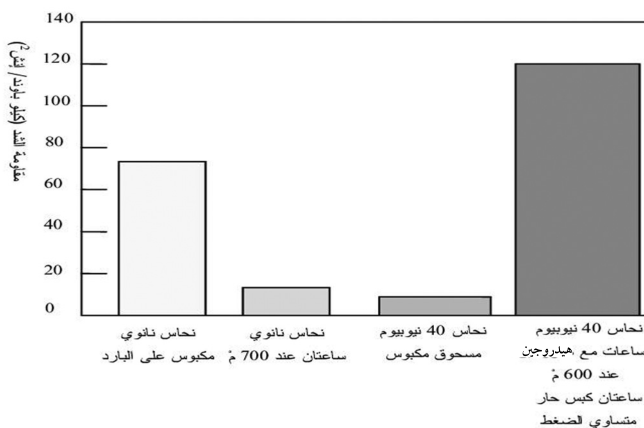
**الجدول 2 ـ 2**: تحسُّن خواص المواد السيراميكية الميكانيكية بالمادة المركَّبة النانوية

| المادة المركَّبة | المتانة (ميغا باسكال م$^{1/2}$) | المقاومة (ميغا باسكال) | درجة الحرارة العظمى (مْ) |
|---|---|---|---|
| $Al_2O_3/SiC$ | 3.5 → 4.8 | 350 → 1250 | 800 → 1200 |
| $Al_2O_3/Si_3N_4$ | 3.5 → 4.7 | 350 → 850 | 800 → 1300 |
| $MgO/SiC$ | 1.2 → 4.5 | 340 → 700 | 600 → 1400 |
| Mullite/SiC | 1.2 → 3.5 | 150 → 700 | 700 → 1200 |
| $Si_3N_4/SiC$ | 4.5 → 7.5 | 850 → 1550 | 1200 → 1400 |

وحُضِّرت مواد مركَّبة نانوية بطريقة تكاثف الغاز الخامل. تتألف هذه المواد النانوية عادةً من طور من الجُسيْمات القاسية متضمَّن في طور معدني طري. وخلافاً للخلائط المعهودة، حيث يمثل الطور المنثور الطور الثانوي، يمثل الطور المنثور في هذه المواد النانوية الطور الرئيس. وباستخدام طريقة تكثُّف الغاز الخامل، فإن عيّنات المادة النانوية Cu-Nb الناتجة تُبدي خواص ميكانيكية أفضل للاستخدامات العالية الحرارة[47].

يبين الشكل 2 ـ 12 قياسات مقاومة الشد عند درجة حرارة الغرفة التي حُصل عليها للنحاس النانوي التبلور الناتج بالكبس على البارد، والنحاس النانوي التبلور الناتج بالتلبيد في الهيدروجين مدة ساعتين عند

درجة حرارة تساوي 700 مْ، وخليطة النحاس ـ 40 في المئة ونيوبيوم المُنتجة بضغط المسحوق العادي باستخدام جُسيْمات نانوية المقاس، والمادة المركَّبة النانوية نحاس ـ 40 في المئة ونيوبيوم المنتَجة بالتلبيد في الهيدروجين مدة أربع ساعات عند 600 درجة مئوية الذي تبعه كبس حار متساوي الضغط عند 900 درجة مئوية مدة ساعتين. تساوي القيمة 830 ميغا باسكال التي قيست للمادة المركَّبة النانوية نحو أربعة أضعاف القيمة المتوقّعة بواسطة قاعدة المزيج. من ناحية أخرى، انخفضت مقاومة النحاس النانوي التبلور للشد من 500 إلى 100 ميغا باسكال بعد تلبيد المسحوق عند 700 درجة مئوية. أخيراً، كانت مقاومة المادة Cu-Nb التي صُنعت بطريقة المسحوق 70 ميغا باسكال فقط. إن الانخفاض الواضح في قيم قساوة ومقاومة الشد في النحاس النانوي التبلور ناجم عن نمو الحُبيْبات السريع أثناء المعالجة بالتلبيد.




**الشكل 2 ـ 12: مخطّط يُظهر قياسات مقاومة الشد عند درجة حرارة الغرفة لمادة نانوية مركّبة من نحاس− 40 في المئة ونيوبيوم مقارنة بتلك التي لمسحوق خليطة نحاس نيوبيوم الموافقة لها، وتلك الخاصة بالنحاس النانوي البلّوري. إن مقاومة الشد الخاصة بالمادة المركَّبة النانوية التي تساوي 828 ميغا باسكال (120 كيلو باوند/ إنش²) تساوي تقريباً 4 أضعاف القيمة التي جرى توقّعها بقاعدة المزائج[47].**

وأنتج كارول (Carroll) وسترنيتسكه (Sternitzke) ودربي[48] (Derby) مواد مركَّبة نانوية $Al_2O_3/SiC$ حيث جرى تغيير مقاس جُسيْمات SiC بطريقة ممنهجة مع ألومينا جَسِيمة باستخدام معالجة المسحوق العادية، وتفكيك البوليمر حرارياً، والكبس الحار.

وقد أبدت جميع تلك المواد النانوية المركَّبة زيادة واضحة في مقاومتها مقارنة بالألومينا ذات الحُبيْبات التي لها مقاس مماثل لمقاس حُبيْبات المادة المركَّبة، ولم تكن ثمة علاقة واضحة بين المقاومة وبين حجم المقوِّي النانوي SiC. إلا أنه يبدو أن ممانعة المواد المركَّبة النانوية للكسر (متانة إزاء الكسر) تزداد مع ازدياد حجم جُسيْم الـ SiC، لكن بقيم اختلفت قليلاً عن قيم متانة الألومينا الجَسِيمة المقاسة بتقنية الخدش لفيكرز (Vickers Indentation Technique).

لذا يمكن تفسير زيادة مقاومة المواد النانوية تلك بتقليص حجم العيب الأعظمي، إلا أنه ما زال من غير الواضح سبب إبداء تلك المواد مقاومة متزايدة للأذى السطحي من دون أي زيادة في المتانة.

لا تتفق النتائج التي حصل عليه كارول[48] وزملاؤه مع نموذج لِفين[49] (Levin) الخاص بتقوية الحدود الحُبيْبية. إلا أن العيوب الحرجة في المواد المركَّبة النانوية تكون عادة أكبر كثيراً من المسافة الفاصلة بين جُسيْمات الطور النانوي. لذا، فإن افتراض أنه يمكن تفسير زيادة المقاومة بانخفاض حجم العيب الحرج متوافق مع بيانات كارول. هذا يعني أن التقييم الكمي لمفعول المادة المركَّبة النانوية يجب أن يقوم على دراسة تفصيلية لعيوب السطح والمعالجة الموجودة في المادة المركَّبة، ولتأثيرها في ابتداء التصدُّع.

إن توضيع البخار كيميائياً وطريقة السلف هما أكثر سيرورتَي تصنيع ملاءمة لإنتاج المادة المركَّبة النانوية ذات الطور الثاني الشديد النعومة المنتثر ضمن حُبيْبات الحاضنة، التي اعتُبرت أصغر وحدة بناء للمواد السيراميكية، أو في ما بينها. إلا أنه من الصعب تصنيع خزفيات إنشائية كبيرة معقدة الأشكال بترسيب البخار الكيميائي بتكلفة منخفضة. لذا حاول الباحثون صنع مادة نانوية البنية بطريقة تعدين المسحوق المعهودة، ووجدوا أن من الممكن صنع مواد مركَّبة نانوية من كثير من المواد المركَّبة مثل $Al_2O_3/SiC$، $Al_2O_3/Si_3N_4$، $MgO/SiC$، $Al_2O_3/TiC$، $Y_2O_3/SiC$، $B_4C/SiC$، $Si_3N_4/SiC$، Natural Mullite/SiC. في البداية، لم يكن من الممكن صنع المواد المركَّبة النانوية تلك إلا بطريقة الكبس الحار، أما الآن، فيمكن صنعها بالتلبيد تحت الضغط الجوي مع الكبس الحار المتساوي الضغط، أو بالتلبيد البسيط تحت الضغط الجوي.

نتيجة للبحث في سيرورة المواد المركَّبة النانوية باستخدام المجهر الإلكتروني، وُجِد أن ظروف تصنيع المواد المركَّبة النانوية بطريقة التلبيد تختلف عن ظروف التلبيد في الطور الصلب والطور السائل. إن النقاط الآتية مهمة للتلبيد في الطور الصلب:

يجب أن يكون قطر حُبيْبة مسحوق الحاضنة بين 100 و500 نانومتر.

**1** ـ يجب انتقاء مسحوق لا تزيد أقطار حُبيباته على 200 نانومتر، كي يمثل الطور المنثور.

**2** ـ يجب خلط مسحوقَي الحاضنة والطور المنثور خلطاً متجانساً.

**3** .يجب انتقاء ظروف التلبيد بحيث تضمن أن الحُبيْبات سوف تنمو في طور الحاضنة، لا في الطور المنثور.

أما في تلبيد الطور السائل باستخدام الـ $Si_3N_4$ حاضنةً، فيجب الاهتمام بالنقاط الآتية:

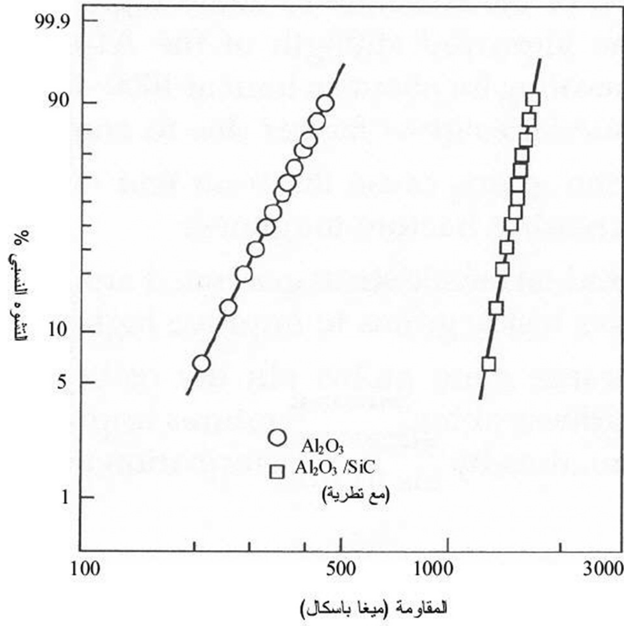
**1** ـ يجب انتقاء مسحوق أقطار حُبيْباته لا تزيد على 100 نانومتر لتكون حُبيْبات الطور المنثور النانوية.

**2** ـ يجب خلط المسحوقين خلطاً متجانساً.

**3** ـ يجب ألا ينحلّ الطور المنثور في الطور السائل الناجم عن مساعد التلبيد (يجب الاهتمام بانتقاء الطور المنثور، ومساعد التلبيد، وشروط التلبيد).

**4** ـ يجب أن يصبح الطور المنثور هو النواة، مع ترسُّب طور $\beta$-$Si_3N_4$ مرة أخرى من الطور السائل.

يبين الشكل 2 ـ13 مقاومة المادتين المركبتين النانويتين $Al_2O_3$/ $SiC$ و$MgO/SiC$ للكسر عند درجة حرارة عالية. تُخفِّض المادتان المركَّبتان النانويتان بشدة نقصان المقاومة عند درجات الحرارة العالية. إن مقاومة الـ $Al_2O_3$ عند 1000 درجة مئوية تشابه مقاومتها عند حرارة الغرفة، ولم تنقص مقاومة الـ $MgO$ حتى وصلت درجة الحرارة إلى 1400 درجة. تُمثّل كلتا الحالتين تحسُّناً هائلاً. وقد أصبح من الواضح أيضاً أن استخدام المواد المركَّبة النانوية يحسِّن كثيراً القساوة ومقاومة الصدمة الحرارية والتعب وزحف الكسر عند درجات الحرارة العالية.

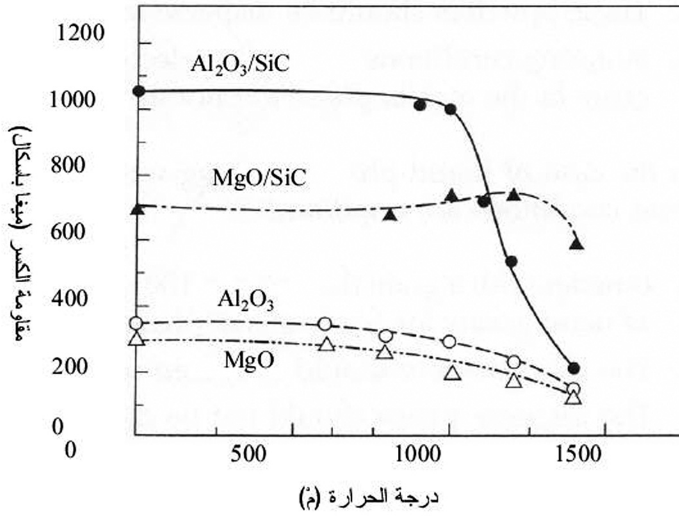



**الشكل 2 ـ 13: مخطط وايبُل لمقاومة المادة المركَّبة النانوية** $Al_2O_3$ /SiC.

ووفقاً لما يُبيِّنه الجدول 2 ـ 2 بوضوح، ثمة تحسُّن كبير في الخصائص الميكانيكية ناجم عن الحُبيْبات النانوية المنثورة، وذلك في مواد مركَّبة نانوية كالـ $Al_2O_3$/TiC وMullite/SiC. وهذا ناجم على ما يبدو عن أن الحُبيْبات النانوية المنثورة تقوم بالأدوار الآتية:

**1 ـ** يولِّد الإجهاد الموضعي الناجم عن الحُبيْبات النانوية حدوداً دون حُبيْبية عند درجة حرارة عالية تسمح للحاضنة بالخضوع إلى تشوّه لدن أثناء التبريد من حرارة التصنيع، ويؤدّي إلى تصغير نانوي المستوى في البنية ما يولِّد مقاومة أشدّ ووثوقية أعلى. إن المقاومة المحسَّنة للمركَّب النانوي $Al_2O_3$/SiC، بعد تطرية حرارية

مدة ساعة تقريباً عند 1000 إلى 1300 درجة مئوية، تنجم عن أن الحدود دون الحُبيبية تنمو أكثر بسبب التطرية. (انظر الشكل 2 ـ 14).




**الشكل 2 ـ 14: مقاومة الكسر في المواد المركَّبة** $Al_2O_3/SiC$ **و**MgO/SiC **عند درجات الحرارة العالية.**

**2** ـ تسبب الحُبيْبات النانوية انحراف مقدمة الصدع، وبذلك تزداد مقاومة الكسر.

**3** ـ يُحرِّض إجهاد الشد المتبقي المتولِّد حول الحُبيْبات النانوية تشققات ضمن الحُبيْبات لتحسين المقاومة عند درجات الحرارة العالية .

**4** ـ نظراً إلى أن الحُبيْبات النانوية تعوّق حركة الانزياح، فإن انخفاض القساوة عند درجات الحرارة العالية يحسِّن مقاومة زحف الكسر، كابحاً التشوه عند درجات الحرارة تلك.

### نمذجة

جرى قياس الزوايا الثنائية المستوى بين ملتقيات حدود الحُبيبات في المواد المركَّبة النانوية $Al_2O_3/SiC$ و$Al_2O_3/TiN$، وذلك من صور ميكرويّة التُقطت بالمجهر الإلكتروني النفقي (Tunelling Electron Microscope) (TEM)، وحُسبت نسبة طاقة الملتقى بين الجُسيْم والحاضنة، $\gamma_1$، إلى طاقة حدود حُبيْبات الألومينا، $\gamma_{gb}$، على أساس شرط توازن الطاقة. ووُجد أن هذه النسبة، أي $\gamma_1/\gamma_{gb}$، تساوي 1.21 في الـ $Al_2O_3/SiC$ و0.80 في الـ $Al_2O_3/TiN$. واستُخدمت هاتان النتيجتان، مع تقديرات للطاقات السطحية، لتقدير طاقات تشقّق الملتقيات. وقد وجد جياو[50] (Jiao) وزميلاه أن طاقة تشقّق ملتقى الـ SiC والألومينا تساوي أكثر من ضعف طاقة تشقق حدود حُبيْبة الألومينا. هذا يعني أن جُسيْمات الـ SiC النانوية تقوّي حدود الحُبيْبة. إن العامل المهيمن في هذه النتيجة هو طاقة السطح الكبيرة للـ SiC المطلي بـ $Al_2O_3$. وبرغم طاقة السطح العالية للـ TiN، وصِغَر النسبة $\gamma_1/\gamma_{gb}$ الخاصة بـ $Al_2O_3/TiN$، فقد وُجد تجريبياً أن جُسيْمات الـ TiN تُضعِف حدود الحُبيبات بدلاً من أن تقوِّيها.

## المواد المركَّبة البوليمرية النانوية

إن تقوية البوليمرات باستخدام الحشوات أو المالئات، العضوية أو غير العضوية، شائعة في إنتاج اللدائن الحديثة.

على غرار المواد المركَّبة الأخرى، تُصمَّم المواد المركَّبة النانوية البوليمرية وتُصنع من مكوِّنات منتقاة. لكن خلافاً للمواد المركَّبة المتقدمة المعروفة، التي يكون فيها مقاس المكوِّن المقوِّي من رتبة

الميكرون، فإن المواد المركَّبة النانوية تستخدم مكوِّناً مقاسه من درجة بضعة النانومترات، أي من مقاس نصف قطر التفاف البوليمر نفسه. أكثر من ذلك، فإن إضافة مكوِّن نانوي المقاس إلى البوليمر يوفِّر أكثر من مجرد التقوية، إلا أن استخدام خواص المكوِّن النانوي، مع تضافرها مع خواص الحاضنة، يؤدّي إلى خواص أخرى ذات قيمة مضافة. من هذه الخصائص، الناقلية الكهربائية والحرارية المحسَّنتان، والعوائق الجيّدة للجُزَيئات الصغيرة، وقابلية الانتفاخ المنخفضة، وقابلية الاشتعال المحسَّنة، والوضوح البصري، وعدم التأثُّر بالظروف القاسية.

تمثِّل المواد المركَّبة النانوية البوليمرية بديلاً جذرياً للبوليمرات ذات الحشوة الشائعة أو خلائط البوليمرات. وخلافاً للمنظومات المعهودة، حيث تكون مقاسات المقوِّيات من رتبة الميكرونات، فإن المكوّنات المنفصلة ذات المقاسات النانومترية (أصغر بحدود 10000 مرة من قطر شعرة الإنسان) هي التي تميِّز المواد المركَّبة النانوية البوليمرية[51].

ويولِّد النشر المتجانس لجُسيْمات الحشوة النانوية المقاس تلك (أو ما يسمى بالعناصر النانوية) نسبة مساحة سطح إلى حجم فائقة الكبر في الملتقيات بين العناصر النانوية والبوليمر المضيف. ومساحة الملتقيات الداخلية الهائلة تلك، والأبعاد النانوية المقاس بين العناصر النانوية، تميّز جوهرياً المواد المركَّبة النانوية البوليمرية من المواد المركَّبة المعتادة واللدائن المحشوة. لذا فإن التراكيب الجديدة من الخواص الناجمة عن البنية النانوية للمواد المركَّبة البوليمرية توفِّر فرصة لتجاوز مقايضات الأداء المعتادة المقترنة باللدائن المقواة الشائعة، وبهذه الصفة، فهي تلخِّص ما تَعِد به المواد المهندَسة نانوياً.

يوفِّر مسح المنشورات المرجعية كثيراً من الأمثلة على المواد

البوليمرية المركَّبة النانوية التي تحقِّق تحسينات هائلة في الخواص الميكانيكية والفيزيائية. إلا أن خواص المواد المركَّبة النانوية المناقشة تقارب عموماً خواص البوليمرات غير المحشوّة والمحشوّة العادية، لكنها بعيدة عن خواص المواد المركَّبة المستمرة المقواة بالألياف. صحيحٌ أن المواد المركَّبة النانوية البوليمرية يمكن أن توفِّر راتنجات حاضنة محسَّنة متعدّدة الوظائف، إلا أنها يجب ألا تُعتبر بديلاً محتملاً لآخر ما تُوصِّل إليه حالياً من مركَّبات مقواة بألياف الكربون.

إن قيمة تقانة المواد البوليمرية المركَّبة النانوية ليست مستمدة، اقتصادياً أو عسكرياً، من التحسينات الميكانيكية للراتنج الصرف فقط، بل إنها تأتي من توفُّر خواص ذات قيمة مضافة ليست موجودة في الراتنج الصرف، من دون التضحية بخواص المعالجة وبالخواص الميكانيكية المتأصلة في الراتنج. عادةً، تتطلب محاولات تكوين مواد مختلطة أو مركَّبة متعدّدة الوظائف مقايضة بين الأداء المرغوب فيه، والخواص الميكانيكية، والتكلفة، وقابلية المعالجة.

وبالنظر إلى عدد المكوِّنات النانوية الممكنة والراتنجات البوليمرية وتطبيقاتها، نجد أن حقل المواد المركَّبة البوليمرية النانوية واسع جداً. إن تطوير مواد متعدّدة المكوِّنات، أكانت ميكرويّة أو نانوية المقاس، يجب أن يوازن ما بين أربعة مجالات متداخلة: انتقاء المكوِّنات، والتصنيع، والمعالجة، والأداء. وهذا ما زال في مرحلة الطفولة بالنسبة إلى المواد المركَّبة البوليمرية النانوية، إلا أن العلماء سوف يطوّرون في النهاية كثيراً من المشاهد التي تفرضها التطبيقات النهائية للمواد المركَّبة النانوية البوليمرية. لقد طوَّر الباحثون منهجيَتَي تصنيع رئيستَين للمواد المركَّبة النانوية البوليمرية: طريقة تحضير المواد المركَّبة محلياً (In Situ Route) وطريقة التقشير (Exfoliation).

حالياً، يقوم الباحثون لدى الصناعة والحكومة والجامعات في شتّى أنحاء العالم باستقصاء مستفيض لتقشير السليكات ذات الطبقات، والمواد المركَّبة من ألياف الكربون النانوية وبوليمرات الأنابيب النانوية، والمواد النانوية البوليمرية الراتنجية العالية الأداء.

وجرى تطوير سيرورة صُهارة محسَّنة لصنع المواد المركَّبة النانوية البوليمرية تتصف بالمزايا التقانية الآتية:

● يمكن استخدام هذه الطريقة لإنتاج طيف واسع من المواد المركَّبة النانوية بأي وزن جُزَيئي، ومنها غير المحشوّة، والمقوّاة بألياف الزجاج والمعدَّلة بالصدم، وذات الألوان الطبيعية، والمستقرّة حرارياً، والمعيقة للهب.

● تُصدر الصلصالات العضوية المستخدمة في هذه السيرورة رائحة خفيفة في أثناء التحضير الكيميائي.

● يُخفِّض بعض وسطاء الانتباج والمواءمة المستخدمة في هذا الابتكار مقدار المزج بالقص اللازم، وينجم عن ذلك تفكّك أقل للبوليمر وانخفاض في الوزن الجُزَيئي.

● تسهِّل السيرورة إزالة المونومرات غير المتفاعلة قبل تكوين المادة المركَّبة النانوية، وهذا مهم لأن الجُسيْمات المنثورة يمكن أن تتداخل مع عملية إزالة المونومرات.

● تسمح طريقة تركيب الصُهارة بإنتاج المواد المركَّبة النانوية البوليمرية غير المحشوة، والمقوَّاة بالألياف الزجاجية، والمعدَّلة بالصدم، وذات الألوان الطبيعية، والمستقرة حرارياً، والمعيقة للهب في خطوة بثق واحدة.

ما هو الفريد في هذه السيرورة؟ تتضمن الحاضنة البوليمرية

بوليمراً قابلاً للمعالجة على شكل صُهارة عند درجة حرارة معالجة لا تقل عن 220 درجة مئوية. وتمتلك الصلصالات العضوية وسطاء انتباج مرتبطة بسطوحها. يُعرَّض المزيج إلى معدل قص كافٍ لتشكيل صُفيحات متجانسة الانتثار ذات سماكة قيمتها الوسطى تقل عن 5 نانومتر، وتصل قيمتها العظمى إلى 10 نانومتر.

لقد أصبح الطيف الواسع للحاضنات البوليمرية ممكناً من خلال مجموعة وسطاء الانتباج والمواءمة الكبيرة التي وفَّرتها هذه الطريقة والتي يتصف كل منها بتفاعل ربط مميز مع كل من جُسيْمات البوليمر والصُفيحات، علاوة على أن تركيبها لا يستدعي شروطاً خاصة تتعلق بتوزعات الوزن الجُزَيئي للبوليمر.

جرى في هذه السيرورة انتقاء «المزيج القابل للتدفق»، المكوَّن من بوليمر وصلصال عضوي، من مجموعة تتألف من $NH_3R_1^+$، $NH_2R_2R_3^+$، $PR_4R_5R_6R_7^+$، حيث:

$R_1$ هو جذر عضوي يحتوي على الأقل على 12 ذرّة كربون أليفاتية.

$R_2$ و$R_3$ هما جذران عضويان يحتويان على أكثر من 5 ذرّات كربون.

$R_4$ و$R_5$ و$R_6$ و$R_7$ هي جذور عضوية تتضمن على الأقل جذراً واحداً فيه 8 ذرّات كربون أليفاتية.

أما وسطاء المواءمة فهي معقدَّات كاتيونية للأمونيوم والفوسفونيوم الرباعي تحتوي على عدد محدّد من ذرّات الكربون الأليفاتية. تغطي هذه الوسطاء طبقات الصلصال العضوي وتسهِّل تقشُّرها. أما النتيجة فهي مزج بالقص مقلَّص وتحلُّل أقل للبوليمر. تُنتقى وسطاء المواءمة بحيث لا تؤدّي إلى التحلُّل (أي لا تسبب قص

السلاسل، أو تولّد أبخرة ضارّة، أو تفكّك الحاضنة البوليمرية).

تتصف السيرورة التي طورها هَنِولْ[52][53] (Honeywell) بعدة مزايا مقارنة بسيرورتَي مزج المونومرات والبلمرة التفاعليتين. من تلك المزايا (أ) إمكان استخدامها مع طيف واسع من الحاضنات البوليمرية، (ب) إمكان استخدامها مع طيف واسع من المواد المركَّبة التي لها الحاضنة البوليمرية نفسها، وذلك بسبب الطيف الواسع من وسطاء الانتباج والمواءمة (لكل منها تفاعل رابط مميز مع كل من البوليمر والجُسيْم الصُفيحي)، و(ج) تحكّم أفضل في توزُّع الأوزان الجُزَيئية للحاضنة البوليمرية. على سبيل المثال، أي مادة بوليمرية قابلة للسيولة يمكن أن تُركَّب مع جُسيْمات نانوية مشتقة من صلصالات عضوية تنقشر في أثناء المزج.

بالمقارنة، تقتصر سيرورتا مزج المونومرات والبلمرة، من بين السيرورات المتنافسة، على البوليمرات ذات المونومرات المتوافقة مع الصلصالات العضوية والتي يمكن بلمرتها بكفاءة بوجود الصلصالات العضوية. أما في سيرورة هَنِولْ المبتكرة، لا يتطلَّب التركيب شروطاً معيّنة تخصّ توزُّع الأوزان الجُزَيئية للبوليمر المنتقى. من ناحية أخرى، تتطلب السيرورات التفاعلية ظروف بلمرة خاصة لكل وزن جُزَيئي مُنتقى، وذلك بسبب مفعول الطور المنثور في اللزوجة وفي آليات البلمرة. وعملياً، أي تحميل للصلصال العضوي ممكن في هذه السيرورة.

إن أكثر الصلصالات العضوية تفضيلاً في هذه السيرورة هي الفيلُّوسيليكات (Phyllosilicates) التي تحتوي على شحنة سالبة على الطبقات (نحو 0.2 ـ 0.9 شحنة لكل وحدة صيغة) وعلى عدد متساوٍ من الكاتيونات القابلة للمبادلة في ما بين الطبقات. والمواد الطبقية المفضّلة هي صلصالات معدنية سمكتيتية من قبيل المونتموريلّونيت

(Montmorillonite) والـنـنـتـرونـيـت (Nontronite) والـبـايـدلـيـت (Beidellite) والـفـولـكـونـسـكـويـت (Volkonskoite) والـهـكـتـوريـت (Hectorite) والـسـابـونـيـت (Saponite) والـسـوكـونـيـت (Sauconite) والماجاديت (Magadiite) والكنيات (Kenyaite).

ومن أجل زيادة تسهيل تجزئة الصلصالات العضوية إلى جُسيْمات صُفَيحية ودرء تكتل الجُسيْمات، يوضع بين الطبقات وسطاء انتباج ومواءمة. تتكون هذه الوسطاء من جزء يلتصق بسطوح الطبقات، وجزء آخر يلتصق بالبوليمر (أو يتفاعل معه بأفضلية). ويبقى وسيط الانتباج والمواءمة النشِط ملتصقاً بسطوح الطبقات في أثناء وبعد معالجة الصُهارة بوصفه طوراً بينياً متميزاً مختلفاً عن الحاضنة البوليمرية الجَسِيمة. وتتفاعل هذه الوسطاء مع سطوح الطبقات، مُزيحة شوارد المعدن الأصلية ومعطية طاقات رابطة مشابهة جداً لتلك التي للبوليمر، محسِّنة بذلك تجانس الانتشار في الحاضنة البوليمرية[54][57].

## خواص المواد المركَّبة البوليمرية النانوية

تزيد الإضافات الصلصالية النانوية صلابة المطاطيات الأوليفينية غير المشبعة والنايلون من دون إيذاء متانتها وقابليتها للامتطاط. فسماكة الجُسيْمات، التي تقع أطوالها بين 300 و1500 نانومتر، تقل عن 1 نانومتر، وهذا يعطيها نسبة طول إلى سماكة مرتفعة جداً لا تُضاهيها فيها أي مقوِّيات زجاجية أو كربونية أو معدنية مألوفة. ويُقال أن النسبة البُعدية الكبيرة، وأحجام الجُسيْمات الصغيرة تُحسِّن كثيراً الأداء الميكانيكي للبوليمر حتى عند إضافات تقل عن 10 في المئة. إن الإضافات المخفَّضة تترك الجُسيْمات تنتشر بسهولة أكبر، وهذا ما يساعد على الحفاظ على شفافية أفضل من تلك المتاحة في المقويّات العادية (انظر الجدول 2 ـ 3).

**الجدول 2 ـ 3**: خواص شائعة

| الخاصية | نايلون 12 معالج | نايلون 12 طبيعي |
| --- | --- | --- |
| القساوة، بدلالة السلم D في مقياس القساوة | D78 | D73 |
| الثقالة النوعية | 1,32 | 1,02 |
| اختبار إيزود للصدم، قدم ليبرة/ إنش (سماكة: 1/ 8 إنش) | 3,89 | 2,60 |
| مقاومة الشد، كيلو باوند للإنش المربع عند مط بمقدار 100 في المئة | 9,2 | 8,3 |
| مقاومة الشد النهائية، كيلو باوند للإنش المربع | 10,4 | 9,8 |
| المط النهائي، في المئة | 135 | 340 |
| عامل الشد، كيلو باوند للإنش المربع | 182,3 | 159,4 |
| عامل الثني، كيلو باوند للإنش المربع | 298 | 180 |

وجد الباحثون والمهندسون لدى إدارة المواد والتصنيع التابعة لمختبرات بحوث القوى الجوية الأميركية AFRL الذين يعملون مع معهد بحوث جامعة دايتون [58]طريقة للتحكم في الناقلية الكهربائية (على مجال يمتد من $10^{-6}$ سيمنس/ سنتيمتر حتى $10^{2}$ سيمنس/ سنتيمتر) في المواد البوليمرية المستخدمة لبناء مكوّنات عسكرية وتجارية فضائية، من دون أن يكون لها تأثير يُذكر في خواص البوليمر الميكانيكية أو قابليته للمعالجة. تحوِّل هذه التقانة الجديدة أي بوليمر استهلاكي تقريباً إلى مادة متعدّدة الوظائف قادرة على حمل أو تبديد شحنات كهربائية كبيرة، وهذا تطور واعد جداً في صناعات الفضاء والطيران والسيارات والكيميائيات. وقد حقَّق أولئك الباحثون هذا التقدم التقاني بنشر متحكم فيه لأنابيب نانوية كربونية، مصمَّمة خصيصاً لهذا الغرض وذات ناقلية كهربائية شديدة مع مرونة جيدة، ضمن حاضنة بوليمرية. إن الأنابيب النانوية تلك تمتلك

مقدرة على النقل الكهربائي مماثلة لمقدرة النحاس، لكن بكثافة أقل كثيراً نسبياً.

كانت أقطار الأنابيب النانوية التي استخدمت في المنتجات النهائية بين 50 و150 نانومتر، مع نسبة بعدية تزيد على 800. إن هذه النسبة العالية تؤدّي إلى محتوى من الحشوة أقل كثيراً لتحقيق التسريب (Percolation) (بداية الناقلية) من ذلك الذي في منظومات الحشوة المعدنية العادية. تقل عتبة التسريب في هذه المواد عن 0.5 في المئة ح. والأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران المستخدمة في هذه السيرورة متاحة بالأطنان، وهذا ما يمكن أن يحقّق توسيعاً معقولاً ومقبول التكلفة لطَيف المواد المركَّبة النانوية الناتجة.

إن المواد المركَّبة النانوية البوليمرية الناقلة كهربائياً، مقارنة بالمنظومات الناقلة المحشوة معدنياً، تحقق تخفيضاً هائلاً في الوزن، ومرونة وديمومة وقابلية معالجة عند درجات حرارة منخفضة، إضافة إلى ناقلية مفصَّلة وفق المتطلبات قابلة لإعادة الإنتاج. يمكن استخدام تلك المواد في إنتاج طلاءات وأغشية وحشوات وكواتم ولواصق وألياف وأغشية رقيقة وصفائح سميكة وأنابيب، جميعها ناقلة، إضافة إلى مواد التحجيب من التداخل الكهرومغنطيسي للمكوّنات الكبيرة البنية، والدهان الكهروساكن ومفرّغات الشحنات الساكنة، والتطبيقات الإلكتروبصرية.

أما مقدرة هذه المواد على امتصاص الترّددات الراديوية العالية، فتلائم تحجيب الكِبال، على وجه الخصوص. ونظراً إلى سهولة معالجتها، يستطيع المهندسون استخدامها لتحجيب الكابلات المحورية بدلاً من الحجاب المعدني المجدول الثقيل الوزن. إن هذه التقانة جاهزة للتسويق التجاري، ومن السهل تطويرها للإنتاج الكمي.

# بعض تطبيقات التقانة النانوية

## الطلاءات والأغشية الرقيقة

تمثِّل المواد النانوية المركَّبة الشبيهة بالألماس والمواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية فئة جديدة من مواد التغشية الرخيصة التي تتصف بالمرونة وبقابلية الالتصاق بكثير من المواد المختلفة (ومنها المعادن والمواد المركَّبة والمواد السيراميكية وأنصاف النواقل والعوازل الكهربائية البلّورية والزجاجية واللّدائن)، وبمقاومة اهتراء كبيرة وقساوة شديدة (8 ـ 20 جيغا باسكال)، وبمعاملات احتكاك شديدة الضآلة (0.03 ـ 0.1)، وباستقرار في كل من البيئة المؤكسدة (حتى 400 درجة مئوية) وغير المؤكسدة (حتى 1200 درجة مئوية). وهذه الأغشية، التي طُوِّرت في الأصل في روسيا على مدى مدة تزيد على 20 سنة، هي الآن قيد التطوير الإضافي والتسويق التجاري[59]. ويبين الجدول 2 ـ 4 مقارنة بين خواص أغشية المواد المركَّبة النانوية المشابهة للألماس (Diamondlike Nanocomposite (DLN)، وأغشية المواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية (Nanocrystalline Atomic Network Composite) (NANC) من ناحية، وأغشية الألماس المتعدّد البلّورات المحضَّر بتوضيع الأبخرة كيميائياً وأغشية الكربون الشبيه بالألماس (Diamondlike Carbon (DLC). ويبين الجدول 2 ـ 5 ملخَّصاً لالتصاقها بركائز مختلفة، حيث تتفوق على التغشية بالكربون الشبيه بالألماس. ويبيّن الجدول 2 ـ 6 خواص استقرارها.

**الجدول 2 ـ 4:** مقارنة بين خواص التغشية بالألماس المتعدّد البلّورات المحضَّر بتوضيع الأبخرة كيميائياً، والكربون الشبيه بالألماس، والمواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس، والمواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية.

| الخاصية | الألماس | كربون شبيه بالألماس | مواد مركَّبة نانوية شبيهة بالألماس | مواد مركَّبة ذات شبكة ذريّة بلورية نانوية |
|---|---|---|---|---|
| درجة حرارة الترسيب الصغرى (مْ) | 600 | 30 | 30 | 30 |
| معدل النمو (ميكرون/ ساعة) | 4.0−0.1 | 1.0−0.1 | 10−2 | 10−2 |
| السماكة العظمى (ميكرون) | 10 < | 3−1 | 10 | 10 |
| قطر الركيزة الأعظمي (مم) | 75 | 150 | 760 | 760 |
| القساوة (جيغا باسكال) | 100−80 | 20−5 | 15−8 | 20−10 |
| قوة الالتصاق* بالكوارتز (نيوتن/ م$^2$) | − | $5 \times 10^7$ | $> 10^8$ | $> 10^8$ |
| عامل الاحتكاك | عالي | 0.1 | 0.1−0.03 | 0.1−0.04 |
| الخشونة | خشن | ناعم | ناعم | ناعم |
| المطاوعة/ الهشاشة | هش | هش/ مطاوع | مطاوع جداً | مطاوع جداً |
| المقاومة الكهربائية النوعية (أوم سم) | $10^{15}-10^{10}$ | $10^7$ | $10^{16}-10^7$ | $10^{16}-10^4$ |
| درجة حرارة الاستخدام القصوى (مْ) | $> 700$ | $< 300$ | $> 400$ | $> 400$ |
| | | | $> 1200$ (خامل) | $> 1200$ (خامل) |

(*) يتصف الألماس والكربون الشبيه بالألماس بالالتصاق الجيد ببعض الركائز فقط، أو يتطلب تحضيراً خاصاً للسطح مع طبقات وسيطة. وتتصف المواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس، والمواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية بالالتصاق الجيد أو الممتاز بأي ركيزة.

تتكوَّن المواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس من شبكتين متداخلتين عشوائيتين متبادلتَي الثبات. إحداهما هي شبكة كربون شبيه

بالألماس مثبتة بالهيدروجين (a-C:H)، مع 50 في المئة من الروابط ($sp^3$)، والأخرى هي شبكة سليكون مثبتة بالأكسجين (a-Si:O). ويمكن إضافة عناصر أخرى، من قبيل الذرّات المعدنية، بوصفها طوراً معدنياً زجاجياً في شبكة عشوائية ثالثة (لتشكل مواد مركَّبة نانوية شبيهة بالألماس مع طور معدني زجاجي). ويُمنع تشكل الكربيد عند درجات الحرارة العالية ببنية الشبكة العشوائية، حتى عند تراكيز معدنية تساوي 50 في المئة. أما الثبات المتبادل لهذه الشبكات الذريّة المقاس فيمنع الغرفتة عند درجات الحرارة العالية، ويحسِّن الالتصاق، ويقلِّص الإجهاد الداخلي في هذه المواد المركَّبة النانوية. يبيّن الشكل 2 ـ 15 رسماً توضيحياً للمواد المركَّبة النانوية المشابهة للألماس.

**الجدول 2 ـ 5:** مقارنة الالتصاق بالركائز المختلفة للألماس الشبيه بالكربون والمواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس(59).

| | فولاذ | Al | Ti | Cu | Au | Co | Cr | Mo | Ni | W | Si | Ge | GaAs | زجاج | لدائن |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ش | ++ | ++ | ++ | - | - | - | - | - | - | + | +++ | + | + | +++ | - |
| ذ | +++ | +++ | +++ | ++ | ++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | ++ | +++ | ++ | ++ |

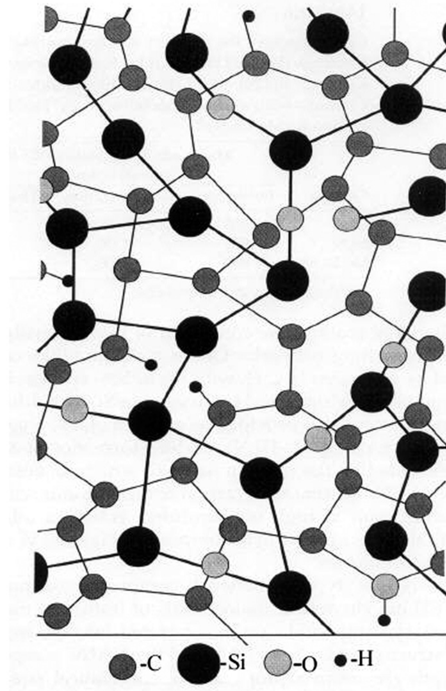
ـ : لا التصاق، + التصاق سيّئ، ++: التصاق جيد، +++: التصاق ممتاز، ش: ألماس شبيه بالكربون، ذ: مواد مركَّبة نانوية شبيهة بالألماس

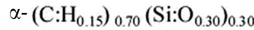
**الجدول 2 ـ 6:** مقارنة استقرار أغشية الكربون الشبيه بالألماس (أ)، وأغشية المواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس (**ب**)، وأغشية المواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس مع طور معدني زجاجي (**ج**)(59).

| نوع التغشية | درجة الحرارة العظمى (مْ) قبل التدمير بـ: | | |
|---|---|---|---|
| | الأكسدة | الغرفتة | الصدمة الحرارية |
| (أ) | 400 | 350 ـ 600 | ـ |
| (ب) | 500 | 1300 | ـ |
| (ج)* | 800 | أعلى كثيراً من 1300 | 2000 |

(*) تتغير القيم مع تغير التركيب

وتتكوَّن أغشية المواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية (NANC) عند تضمين عناقيد أو بلّورات نانوية تتراوح مقاساتها بين 1,5 و100 نانومتر من معدن انتقالي أو مركَّبات حرارية عالية درجة الانصهار في البنية ذات الشبكتين. ويمكن تفصيل بنية كل من المواد النانوية المركَّبة الشبيهة بالألماس (DLN) والمواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية (NANC) لاستمثال خواص مرغوب فيها تخص المقاومة الميكانيكية والقساوة والمقاومة الكيميائية.





$\alpha$- $(C:H_{0.15})_{0.70}\,(Si:O_{0.30})_{0.30}$

**الشكل 2 ـ 15: رسم توضيحي للبنية الذرية للمادة المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس.**

**ملاحظة: حذف المترجم جزءاً من التعليق على الشكل لعدم صلته به[59].**

تُرسَّب الأغشية بسيرورة متخصِّصة تجمع بين البلازما وتقانة حزمة الشوارد، وتُطبَّق على سطوح خشنة ومنحنية أو مستوية، أو حتى على بعض السطوح الداخلية، وذلك بعد مواءمة التجهيزات، عند درجات حرارة منخفضة تتراوح بين 30 و250 مْ. وباستخدام التجهيزات الحالية، يمكن تغشية ركائز تصل أقطارها حتى 760 ملم بسماكة غشاء تتراوح بين 20 نانومتر و10 ميكرون. ويمكن أيضاً لأغشية المواد النانوية المركَّبة الشبيهة بالألماس، وأغشية المواد المركَّبة ذات الشبكة الذريّة البلّورية النانوية أن تُرسَّب على شكل طبقات متناوبة.

من الخواص المفيدة المنسوبة إلى التغشية بالمواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس تواؤمها الكيميائي ومقاومتها العالية للصدمة الحرارية، وخواصها الكهربائية والبصرية التي يمكن التحكّم بها (من قبيل قرينة انكسار الضوء). أما المواد المركَّبة النانوية الشبيهة بالألماس المزدوجة الشبكة فهي مواد عازلة كهربائياً، إلا أن ناقليتها يمكن أن تُغيَّر بنحو 18 ـ 20 مرتبة كِبَر ( $10^{-4}$ حتى $10^{16}$ أوم سم)، وذلك بالتحكم في تركيز المعدن في الشبكة المتداخلة الثالثة.

ثمة تطبيقات ممكنة كثيرة لأنواع التغشية الاستثنائية هذه. ويعتقد الباحثون أن هذه الأنواع من التغشية سوف تصبح أكثر جدوى اقتصادياً من التغشية بالألماس المتعدّد البلّورات المُنتَج بتوضيع الأبخرة كيميائياً، ومن التغشية بالكربون الشبيه بالألماس.

إن الفرص أمام التغشية والطلي بهذه المواد كثيرة جداً وتشمل كامل القاعدة الصناعية: صناعة السيارات والطائرات والطاقة والإلكترونيات والمعالجة الكيميائية والعناية الشخصية وتجهيزات المكاتب والقطاعات الطبية، التي يتضمّن جميعها مكوّنات من قبيل القواطع الكهربائية المستخدمة في الطاقات العالية، وتجهيزات

الأمواج الميكرويّة، ومكوّنات التطبيقات البلازمية، والأغشية شديدة العازلية في الإلكترونيات، والشاشات المسطحة... إلخ.

إلا أن ثمة عائقاً أساسياً في وجهها يجب تجاوزه، هو أن جُزَيئاتها غير مستقرة إلى حد أنه إذا تلامس اثنان منها أو أكثر، فإنهما يندمجان معاً ويفقدان أي شكل أو خواص حُدّدت لهما حين تصميم المادة النانوية. ويكمن حل هذه المشكلة في استخدام أغشية مصنوعة من الريسورسينارين (Resorcinarene)، وهو خافض توتّر سطحي عضوي مكوَّن من رأس له شكل الوعاء وعدة ذيول هيدروجينية رابطة. في أثناء عملية التغشية، يساعد انحناء الريسورسينارين الجُزَيئات على الالتصاق بالجُسيْمات النانوية المعدنية. ويستخدم الباحثون أيضاً مواد كيميائية لخياطتها معاً لتشكّل قفصاً بوليمرياً حول الجُسيْمات النانوية. إن هذا الغشاء المسامي يجعل الجُسيْمات تتفاعل مع العناصر الخارجية، من دون أن تتفاعل مع جُسيْمات مغشاة أخرى مثلها. تجعل هذه السيرورة جُسيْمات تصل أقطارها حتى 50 نانومتر مستقرة، إضافة إلى الجُسيْمات ذات الخواص المغنطيسية. وقد مكَّن هذا المهندسين من تطوير مواد للتجهيزات الإلكترونية الميكرويّة والمُحِسَّات المغنطيسية[2].

### الإلكترونيات النانوية

كي تصبح الإلكترونيات أسرع، يجب في نهاية المطاف أن تنكمش حتى تبلغ السلّم النانوي. لكن صنع أسلاك ومفاتيح بذلك الحجم الضئيل ليس أمراً سهلاً. إلاّ أنّ الجُزَيئات الحيوية، بمقدرتها على التجميع الذاتي، توفّر نهجاً واعداً. وفي بحث أُجري في جامعة شيكاغو، هندَس العلماء بروتينات لتكوِّن نوى لأسلاك ذهبية لا يزيد عرضها على 80 نانومتر.

بدأ العلماء ببرايونات (Prions) الخميرة، وهي بروتينات غير ضارة من أقارب البروتينات المسبِّبة لجنون البقر. وضمن ظروف معيّنة، تشكّل تلك البرايونات تلقائياً فيبريلات (Fibrils)، وهي ألياف دقيقة يساوي قطر الواحد منها 1 نانومتر. وهندس فريق جامعة شيكاغو الفيبريلات وراثياً لترتبط بشدة بجُسيْمات نانوية ذهبية حُضِّرت لهذا الغرض. وكانت النتيجة فيبريلات مبقعة ببقع ذهبية. ولملء الفجوات بين البقع، أضيفت فضة، ثم أضيف مزيد من الذهب، وكانت النتيجة أسلاكاً ناقلة كهربائياً.

تتفوّق البرايونات بمزاياها على الجُزَيئات الحيوية الأخرى التي حاول الباحثون حتى الآن استخدامها في الإلكترونيات النانوية. فقد مكَّن مزج الفضة مع الدنا (DNA)، على سبيل المثال، العلماء من صنع أسلاك نانوية يمكن أن تعطي بعدئذٍ أشكالاً تشابه الدارات، وذلك بفضل مقدرة الدنا على ربط سلاسل متتامة معاً. لكن الروابط الضعيفة بين جدائل الدنا تنزع نحو الانكسار بسهولة. إلا أن هذه الظاهرة لا تمثِّل مشكلة بهذه الخطورة في فيبريلات البروتينات.

وطوَّرت مختبرات أخرى بروتينات يمكن أن ترتبط بنحو 30 مادة إلكترونية ومغنطيسية وبصرية مختلفة، ثم تُجمِّع المواد في بُنى. وكان الهدف هو مكاملة البروتينات في منظومة تجميع ذاتي لإيجاد طريقة «لتنمية» مواد من قبيل أنصاف النواقل بأي شكل يرغب فيه الباحثون. ومع أنه من المستحيل التوقّع بطول المدة التي سوف تحتاجها هذه التقنية لتجد طريقها إلى الاستخدام الصناعي، فإن البحث يُرسي أسُساً صلبة لتقانة نانوية عملية.

وبنى الباحثون ما يصفونه بأنه أول مضخة حرارة كهروحرارية في العالم تتضمن مواد نانوية المقاس. تَستخدم التجهيزات الكهروحرارية عادة الطاقة الكهربائية لتحقيق تسخين أو تبريد، أو

تقوم بتحويل الحرارة إلى كهرباء. ومن التطبيقات المحتملة لها برادات حالة صلبة ومكيفات هواء، ومنابع قدرة كهربائية متراصّة وأعلى كفاءة. لقد صُنع نموذج المضخّة الأولي، وهو بحجم طابع البريد، من شبكات فائقة: طبقات أغشية رقيقة متناوبة من نوعين من أنصاف النواقل، هما تلُّريد البيسموث (Bismuth Telluride) وتلُّريد الأنتيموان (Antimony Telluride). وتبلغ سماكة كل غشاء (من نحو 1000 غشاء رقيق) ما يقارب بضع عشرات الأجزاء من المليار جزء من السنتيمتر، ويحتوي على ما يصل إلى 24 طبقة من الذرّات.

يدفع التيار الكهربائي المار عبر الشبكات الفائقة (وهي مزدوجات حرارية) الحرارة نحو أحد طرفي الدارة، فيبرد الطرف الآخر بكفاءة غير مسبوقة. يمكن تحقيق كثافات طاقة موضعية تقارب 700 واط/سم$^2$ في هذه المضخة، وهذا ما يجعلها مفيدة لمهام يومية من قبيل التبريد وتوليد الطاقة. إن تجهيزات الغشاء الرقيق هذه تستجيب إلى تغيُّرات في شدة التيار الكهربائي خلال مدة تساوي 10 إلى 20 ميكروثانية، أي إنها أسرع بنحو 23000 مرة من المواد الكهروحرارية الكبيرة المقاس.

على سبيل المثال، برَّدت مضخة مصنوعة من هذه الأغشية الرقيقة كتلة من الفولاذ الصلب من 79 حتى 64 درجة فهرنهايت خلال دقيقتين، وهذا أسرع كثيراً مما يمكن أن تفعله البرّادات العادية. ويمكن لأداء هذه التجهيزات أن يقارب أداء التجهيزات الكهروحرارية الكبيرة الحالية، لكنْ بأحجام أصغر بمقدار 40000 مرة من أحجام تلك التجهيزات. ويمكن للتحسينات الجارية أن ترفع كفاءتها ثلاثة أضعاف أيضاً.

في النهاية، يمكن لمضخات الشبكات الفائقة أن تحل محل معظم منظومات التبريد وتكييف الهواء الميكانيكية. وأول التطبيقات

المحتملة لها هي مضخات ضئيلة للتبريد الموضعي في المعالجات الصغرية أو ليزرات الاتصالات، ويتبعها التبريد والتسخين المجهريان لتنظيم تغيرات الحرارة موضعياً في حاضنات الدنا الميكرويّة.

تحتوي رقاقات السليكون الحالية على أشكال تنخفض مقاساتها حتى 130 نانومتر. لكن الاستمرار في تقليص حجوم رقاقات السليكون أصبح أغلى وأشدّ صعوبة. يقول جون روجرز (John Rogres)، مدير بحوث التقانة النانوية لدى المختبرات (Lucent Technologies' Bell Labs): «في وقت ما، سوف يستنفد السليكون قوته المحرّكة، وسوف تكونون بحاجة إلى شيء آخر، من قبيل ترانزستور بحجم جُزَيء واحد». صحيحٌ أن الرقاقات المصنوعة من ترانزستورات جُزَيئية ما زالت تحتاج إلى عقد من السنين، على الأقل، لتسويقها، إلا أنها أفضل ما تأمله الصناعة لبناء حواسيب أسرع وأرخص في القرن الحالي.

ويقول فيليب كويكس (Philip Kuekes)، وهو مهندس بناء حواسيب لدى المختبرات (Hewlett-Packard Laboratories): «بالإلكترونيات التي نتحدث عنها، لن يكون الحاسوب في ساعة يدك، ولا في زر من أزرار قميصك، بل في واحد من خيوط قميصك». يعمل كويكس وزملاؤه على تصميم دارات تقوم على صفيفات متعامدة من الأسلاك الضئيلة، موصولة في كل نقطة تقاطع بترانزستورات جُزَيئية. وبحلول منتصف العقد القادم، يقول كويكس، سوف تعرض الشركة Hewlett-Packard دارة منطقية مقدرتها تماثل المقدرة التي كانت للدارات القائمة على السليكون في عام 1969. يقول كويكس: «إننا نحاول إعادة اختراع الدارة المتكاملة، بمنطقها وذاكرتها وتوصيلاتها الداخلية، بسيرورة تصنيع جُزَيئي محكمة».

لكن قبل أن يُقلِع أول حاسوب في خيط من قميصك بوقت

طويل، سوف تبدأ الشركات بمكاملة المكوّنات الإلكترونية النانوية، ومن ضمنها الأسلاك الضئيلة والذواكر الحاسوبية الفائقة الكثافة، ضمن الإلكترونيات السليكونية العادية. فمثلاً، ثمة شركتان تخططان لجعل نماذج أولية لتجهيزات ذاكرة جاهزة في عام 2004، ونماذج إنتاجية جاهزة في عام 2006. إن التجهيزات التي تستطيع خزن بت من البيانات في جُزَيء واحد يمكن أن تحقّق سعات خزن أكبر بآلاف المرات من تلك التي توفّرها الذواكر الإلكترونية المستخدمة في الحواسيب الحالية.

ويستخدم الباحثون أيضاً الإلكترونيات النانوية لتطوير مُحِسَّات حيوية وكيميائية جديدة ليست ممكنة بالتقانة القائمة حالياً. ويقوم أحد الباحثين بتطوير مُحسَّات من أسلاك السليكون النانوية، التي يغير التماس حتى مع جُزَيء واحد منها حالة السلك الإلكترونية. إن الباحثين يستطيعون قياس ذلك التغيّر، ومن خلاله يستطيعون كشف جُزَيئات غير معروفة في مجال التشخيص وكشف العوامل المُمْرضة.

### مواد عظمية جديدة

لقد قطع مهندسو النسُج شوطاً واسعاً في تنمية أجزاء عظمية في المختبرات، وثبت أن من الصعب جداً التعويض عن مقاطع كاملة من عظام الساق أو الذراع التي تتعرض لإجهادات مستمرة. لكن الباحثين لدى جامعة رايس طوّروا تقنية لتنمية نسُج عظام قوية بقدر يكفي لتحمُّل إجهادات الأنشطة اليومية. تتضمن الطريقة المعتادة لهندسة النسُج العظمية التعويض عن العظم المفقود بحامل بوليمري يتفكك حيوياً محشو بالخلايا. وحينما يتفكك البوليمر، تنشأ نسُج جديدة. لكن خلايا الأجزاء الحاملة في الهيكل العظمي تهترئ باستمرار وتتكوَّن عظام جديدة استجابة للتحريض الميكانيكي. وإذا

كان الحامل البوليمري الموضوع ضمن ساق شخص ضعيفاً جداً، فإن المادة تنهار بسبب الإجهاد. لذا، وبغية تقوية المادة الحاملة، أضاف المهندسون الحيويّون والكيميائيون جُسيْمات نانوية من الألوموكسان (Alumoxane) (مركَّب قائم على الألمنيوم) إلى بوليمر حسّاس ضوئياً. ويحفّز ضوء يسلّط على هذا الخليط الجُسيْمات النانوية للالتصاق بسلاسل البوليمر. إن تحمّل المادة الناتجة للضغط يساوي 3 أضعاف تحمّل البوليمر وحده.

## الأحذية

يستخدم المهندسون في إدارة المواد والتصنيع لدى مختبرات بحوث القوى الجوية الأميركية[60] مركَّبات نانوية مع مقوّيات نانوية أصغر بعشرة آلاف مرة من قطر شعرة الإنسان لصنع مكوّنات مهمة لكل من النظم العسكرية والتجارية. ويمكن لهذه التقانة أن تكون مفيدة أيضاً للصناعة الاستهلاكية من خلال التصميم والتطوير الناجحين لمنتجات استهلاكية ديناميكية جديدة. إذ يمكن لمواد مركَّبة نانوية ذات حاضنة بوليمرية أن تحل محل مواد مركَّبة وبوليمرات تُستخدم حالياً في صناعة بُنى جزئية حرجة في المركَبات الجوية والفضائية، ومثبّتات خراطيم الوقود، وحجرات الاحتراق، وحاويات الخزن الشديدة التبريد، مؤدّية إلى تخفيض هائل للوزن والتكلفة. وأدى نقل هذه التقانة الجديدة إلى الصناعة الخاصة إلى صنع جيوب تُملأ بالهيليوم لاستخدامها في أحذية العدَّائين.

تُستخدم الجيوب الممتلئة بالهيليوم لتوفير طراوة وامتصاص صدمات أفضل كثيراً مما توفّره الأحذية العادية. وقد مكّنت هذه التقانة مصنِّعي الأحذية من تصميم أحذية ذات كعب أخفض يجعل القدم أقرب إلى الأرض بـ 25 في المئة مما توفِّره الأحذية العادية.

ونظراً إلى صعوبة احتواء الهيليوم في اللّدائن، استُخدمت صُفَيحات نانوية المقاس في الجيوب لمنع الغاز من التسرّب.

### المُحِسَّات الحيوية/ نمذجة الإلكترونيات البصرية

ثمة سعي لدى مركز بحوث آمس (Ames Research Center) لتطوير محسَّات حيوية لتشخيص السرطان، وقد تشارك هذا المركز مع معهد السرطان القومي الأميركي في تطوير أخذ عيّنات من نُسُج حيّة باستخدام الإلكترونيات النانوية لتجاوز التقنيات الحالية التي تستغرق عادة من أسبوع إلى أسبوعين لإعطاء النتيجة، فالتقانة الجديدة تعطي النتيجة فوراً.

وفي الإلكترونيات البصرية، ينصبّ اهتمام الأبحاث على النمذجة والمحاكاة لفهم مفاعيل الميكانيك الكمومي في تأثير الإشعاع في أداء التجهيزات. وهي تساعد أيضاً على تصميم الليزرات والكواشف الكمومية.

### الإلكترونيات الجُزَيئية

تُستخدم النمذجة والمحاكاة لتوليد خواص جُزَيئية وإيجاد مواد تصميمية. وفي التقانة النانوية، تُستخدم النمذجة لتصميم مكوّنات إلكترونية نانوية، ومحسَّات حيوية وكيميائية، وبُنى تقوم على الأنابيب النانوية.

### الأسلاك النانوية غير العضوية

لقد استُخدمت مواد السليكون وزرنيخ الغاليوم ونيتريد الغاليوم مدة طويلة بأشكال مختلفة. والآن، وعوضاً عن الأغشية الرقيقة الثنائية الأبعاد، يقوم مركز بحوث آمس بتنمية أغشية على شكل سلك

وحيد البعد. في البعد الواحد، تبدو الخواص أفضل كثيراً من خواص نظيراتها الثنائية الأبعاد. وبوجود خواص أفضل، تصبح مكاملة التجهيزات بكثافات أعلى كثيراً ممكنة.

## المُزلِّقات

يقول الناس إن الماء والزيت لا يمتزجان. إلا أنهما يمكن أن يوجدا معاً على شكل جُزَيئات منفصلة على السطح نفسه. وهنا تكمن الفرص والتحديات بالنسبة إلى الباحثين لدى الحكومة الأميركية الذين يساعدون الصناعة على تطوير أغشية تزليق وحماية للسطوح يمكن أن تحمي الآلات الفائقة الصغر ومكوّناتها التي هي أصغر منها من الاحتكاك والاهتراء.

سوف تكون ثمة حاجة إلى المزلِّقات الشديدة الرقة أو الأغشية الوحيدة الطبقة في الآلات النانوية الضئيلة القادمة، من المحسَّات البيئية التي بحجم حبة الغبار حتى آلات إصلاح الخلايا المعطوبة. إن نُظُم التزليق الحالية، من قبيل مركَّبات الفلوروكربون (Fluorocarbon) والطلاءات الكربونية السطحية المستخدمة في سواقات الأقراص المغنطيسية، قد لا تكون ملائمة لتحقيق متطلبات الأداء القاسية المنظورة في تطبيقات التقانة النانوية.

بالتعاون بين صناعتي وسائط خزن البيانات والتزليق، يستقصي فريق حكومي إمكانات التزليق بغشاء وحيد الطبقة مختلط الجُزَيئات. ويقوم الفريق باختبار تراكيب جديدة مكوَّنة مما يصل إلى أربعة جُزَيئات مختلفة، اختير كل منها لتحقيق وظيفة معيّنة، من مقاومة الاهتراء حتى الإصلاح الذاتي. على سبيل المثال، تلتصق في أحد التراكيب مجموعة معيّنة من الجُزَيئات بالسطح بقوة، مُرْسيةً غشاءً يحمي من التصادمات التي تؤدّي إلى اهتراءات شديدة.

وتسبح جُزَيئات أخرى بين تلك المجموعات لدرء الاحتكاك.

أما المرحلة القادمة فهي تطوير طرائق اختبار لتقييم المواد الجديدة وتراكيبها المرشحة لتكون مزلِّقات.

## البوليستر

يمكن للمواد المركَّبة النانوية البوليسترية غير المشبعة أن توفّر مقاومة كيميائية أكبر، واستقرار أبعاد أفضل، ومقاومة نيران أشد مما توفّره الصيغ المعهودة، وفقاً لرأي العلماء. فقد أثبتت جُسيْمات الصلصال النانوية، المرشحة للاستخدام في تشكيل بوليمرات التصلّب الحراري، إضافة إلى المواد المركَّبة النانوية البوليسترية غير المشبعة المقوّاة بالزجاج للتطبيقات البحرية، جدارتها فعلاً. لقد استُخدمت منتجات الصلصال النانوية الحجم، بعد تعديلها كيميائياً، في صنع مواد مركَّبة نانوية بوليمرية.

ويمكن للمواد المركَّبة النانوية المحتوية على مقدار ضئيل من تلك الجُسيْمات النانوية (10 ـ 2 في المئة) وأن تعطي خواص تضاهي (وأحياناً تفوق) خواص المواد المركَّبة العادية التي تحتوي على 20 ـ 35 في المئة من الفلزات أو الزجاج. وهي تقلِّل اهتراء الآلات أيضاً، إضافة إلى أن معالجة تلك المواد أسهل. ونظراً إلى أن كثافات الجُسيْمات الفلزية والزجاجية النانوية الموجودة فيها تساوي ضعف تلك التي في البوليمرات، فإن قطع السيارات والتطبيقات الحساسة للوزن هي المجال الكبير الأهمية لهذه المركَّبات النانوية. لقد بيَّنت الأبحاث أن تلك الجُسيْمات النانوية تعمل جماعياً مع مواد فلزية وألياف زجاجية أخرى.

من التطبيقات التجارية لتلك المواد المركَّبة النانوية استخدام البولي أميد 6 (Polyamide) والبولي بروبيلين (Poly-propylene) لصنع

العلب والأدوات التي تقولَب بالحقن، والبولي أميد شبه المتبلور لصنع خزانات ونظم الوقود الكتيمة جداً إزاء التسريب، وأغشية الإيبوكسي للعزل الكهربائي وعوازل الجهد العالي، وكِبال البولي أوليفين (Polyolefin) المقاومة للنار، والعلب الكهربائية، ومواد البناء.

توجد سوق بوليمرات التصلّب الحراري حيث تظهر تطبيقات جديدة في أسواق البحرية والصناعة والبناء. ثمة تقارير عن أن صيغ المواد المركَّبة النانوية البوليسترية غير المشبعة المتاحة اليوم تتصف بمقاومة كيميائية جيدة، وبخاصة تجاه مياه البحر والمواد الكيميائية التي تُحدث تآكلاً، وهي أكثر استقراراً من حيث الأبعاد، إضافة إلى أنها مقاومة للنيران. تُستخدم المواد المركَّبة النانوية البوليسترية غير المشبعة في مكوّنات الزوارق، حيث يُقال إنها أقل عرضة لبهاتة الألوان. وثمة فائدة أخرى أيضاً في مواد الإيبوكسي هي تحكّم أفضل بالرخاوة (يُعرَّف التحكّم بالرخاوة بمقدرة الراتنج السائل على الجفاف تماماً والالتصاق بحصيرة الألياف الزجاجية قبل المعالجة الحرارية). كانت السيليكا المُدخَّنة تُستخدم عادةً للتحكّم بالرخاوة، إلا أن جُسيْمات الصلصال النانوية تنتِج نوع الانسياب نفسه الذي تولده السليكا المدخَّنة في بوليمرات التصلّب الحراري، موفّرةً بذلك تحكّماً بالرخاوة إلى جانب تحسينات إضافية في خواص الجزء المصلَّد حرارياً. أضف إلى ذلك أن جُسيْمات الصلصال النانوية أسهل نثراً وأقل تكلفة، موفّرةً جميع تلك المزايا بتكلفة قليلة، أو بتكلفة لا تزيد على تكلفة المواد المركَّبة الموجودة حالياً.

### المواد السللوزية

نتج من بحث أُجري في معهد البوليتكنيك في جامعة فرجينيا سيرورة تتألف من خطوة واحدة لإنتاج مواد مركَّبة نانوية حرارية

التلدُّن من ألياف السللوز. بمعالجة ألياف لبّ الخشب في محلول يُدخِل تعديلاً جزئياً فيها، ثم بكبسها وهي ساخنة، تتشكّل صفيحة بوليمرية شبه شفافة من إسترات السللوز والسللوز غير المعدّل. إن معالجة المحلول تجعل سطوح الألياف الميكرويّة ضمن كل ليف من لبّ الخشب قابلة للانسياب بالصهر. تتصف هذه المادة بصفات البوليمرات الحرارية التصلّب من حيث مقاومتها للماء، وقابليتها للتشكيل حرارياً، وقابليتها للتمديد. إلا أنها مادة مركَّبة نانوية، لا خليط مواد، ولذا تحتفظ بخواص ألياف السللوز التي تستخدمها الطبيعة للتقوية.

يقول الباحثون إن «السللوز غير المعدّل يضيف قوة وقابلية تحلّل حيوية... وأنه أرخص أيضاً من مواد إسترات السللوز المعالَجة معالجة قوية والمتاحة تجارياً. وهي تأتي من مورد متجدّد، وقد طوِّرت لها سيرورة منخفضة الاستهلاك من حيث المواد ومدة المعالجة». يُتوقع أن تُستخدم هذه المواد المركَّبة النانوية الحرارية حيثما تكون المتانة ومقاومة الرطوبة والحرارة مهمة، كما هو الحال في لوحات الإضاءة في صناعات النقل، وفي علب المنتجات والأدوات الكهربائية.

### السيارات

أدّى تطوير طائفة من المواد المركَّبة النانوية القائمة على أحد بوليمرات التلدّن الحراري الأوليفينية إلى انخفاض وزن نموذج أولي للوحات غطاء مؤخرة السيارة ولوحات الأبواب الخارجية، وإلى تحسُّن في استقرار أبعاده ومتانته ومقاومته للصدمات عند درجات الحرارة المنخفضة. وقد أتت هذه المواد من تطوير مشترك قام به قسم البحث والتطوير لدى شركة General Motors وشركة Montell North America in Troy.

«إن تضمين جُسيْم دون ميكرويّ في ركيزة بوليمرية، من قبيل بوليمرات التلدّن الحراري الأوليفينية، يحسِّن خواصها الفيزيائية من دون زيادة في وزنها أو تدنٍّ في خواصها عند درجات الحرارة المنخفضة أو في شفافيتها»، هذا ما قاله ثيو زويغرز (Theo Zwygers)، المدير التقني لـ (Montell's Automotive and Industrial Business Group).

واختار المهندسون في الشركتين المذكورتين طائفة من الصلصالات الطبيعية، تُعرف بالصلصالات السمكتيتية، لتكون المكوِّن الذي يعطي الصفة النانوية. إن استخدام صلصال سمكتيتي منعَّم بنسبة 5 في المئة في بوليمرات التلدّن الحراري الأوليفينية يحقِّق متانة مكافئة لمتانة مادة محشوّة بالتالك بنسبة 25 حتى 35 في المئة. يجري إنتاج هذه المواد المركَّبة الجديدة باستخدام تجهيزات التصنيع الموجودة، وهي تتصف بإمكانات جيدة لإعادة تدويرها.

## حفظ الأغذية

يستخدم المهندسون في جامعة بوردو (Bordeaux) ووزارة الزراعة الأميركية التقانة النانوية والكريَّات المغنطيسية مع وسائل جديدة أخرى لكشف المواد الضارة في الأغذية. وهدف الباحثين من ذلك هو منع المتعضيات الجرثومية من قبيل الجراثيم والعصيّات المعوية وغيرها من دخول الطعام في أي مرحلة من مراحل تصنيعه، أكان في المزرعة أم في معمل المعالجة أم على طاولة المستهلك.

تتضمن بعض المشاريع الموجودة في الخدمة فعلاً طريقة كشف لأنواع الفطور في الحبوب، وأخرى تستخدم رقاقات صغيرة مع إشارات إلكترونية للعثور على أنواع من الجراثيم المعوية. وثمة طريقة كشف أخرى في قيد التطوير لاختبار سريع يتوقّع بسُمِّية البوليكلورين بيفينيل (Polychlorinated biphenyl) في الأسماك.

### البصريات

لقد وصل مهندسو الشبكات المعلوماتية إلى أقصى ما يمكن أن تفعله الإلكترونيات الحديثة. وبدأت شبكات الاتصالات بالتعامل مع الضوء، أو الفوتونات، بدلاً من الإلكترونات لتحقيق معدّلات أعلى لنقل البيانات. ويعتقد معظم المهندسين أن البدَّالات (المقاسم) الضوئية النانوية الحجم سوف تشكّل في النهاية أساس فقار الشبكة الضوئية الشاملة التي تقوم فيها المرايا والعدسات بتوجيه تيارات من الضوء المحمَّل بالبيانات من دون التأخيرات المعهودة في البدَّالات الحالية التي تحوِّل الضوء إلى إشارات كهربائية، ثم تعيدها لتصبح ضوئية.

### أنيبوبات الكربون

يعتبر الكثيرون أن هذا الحقل هو أنشط حقول أبحاث التقانة النانوية، ويرون أن أنابيب الكربون سوف تكون لبِنات البناء الأساسية في التقانة النانوية. يمكن استخدام هذه الأنيبوبات في المواد المركَّبة لزيادة مقاومتها للشدّ، ويمكن استخدامها أيضاً لتحقيق تقدُّم جوهري في الإلكترونيات الميكرويّة، وذلك من خلال تحسينها للدارات السليكونية. إلا أن الأمل الحقيقي هو أن أنيبوبات الكربون يمكن أن تُستخدم لتحلّ محلّ الدارات السليكونية من حيث المبدأ، وبذلك يتمدّد أمد قانون مور الذي يعاني الآن علائم النضوب. إن تجهيزة جُزَيئية مماثلة للترانزستور يمكن أن تكون أسرع أداء وأكثر مقدرة من أي دارة مبنية من السليكون بمقدار هائل.

### المحرّكات النانوية

بنى المهندسون لدى جامعة كاليفورنيا في بركلي محرّكاً نانويّ المقاس. يصف ألكس زِتّل (Alex Zettl)، أستاذ الفيزياء في جامعة

كاليفورنيا والعالم لدى مختبرات لورانس بيركلي الأميركية، المحرّك بـ «أنه أصغر محرّك صناعي بُني في العالـم، ومع ذلك ما زالت الطبيعة متقدمة علينا بعض الشيء، فهناك محرّكات حيوية بالحجم نفسه أو أصغر قليلاً، لكننا سوف نلحق بها».

يبلغ عرض المحرّك نحو 500 نانومتر. ويتراوح طول القلب الدوّار فيه بين 100 و300 نم. أما سماكة المحور المصنوع من أنبوب كربوني، والذي يستند إليه القلب الدوّار، فتتراوح بين 5 و10 نم.

يتكوَّن محور المحرّك من أنبوب نانويّ متعدّد الجدران، أي إنه يتكوّن من أنابيب نانوية متمحورة معاً مثبّتة على القلب الدوّار وعلى علاليق ثابتة. يتيح الأنبوب النانوي الجاسئ، الملتحم بالقلب الدوار، الدوران نحو عشرين درجة فقط. إلا أن فريق العمل تمكَّن من كسر الجدار الخارجي للأنابيب المتمحورة للسماح للأنبوب الخارجي والقلب الدوار المرتبط به بالدوران دورانا حرّاً حول الأنابيب الداخلية وكأنه محمول على حامل عديم الاحتكاك.

لبناء المحرّك، صنع زِتّل وفريقه عدداً كبيراً من الأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران داخل قوس كهربائية ورسَّبوها على سطح مستوٍ من أُكسيد السليكون الموجود على ركيزة سليكونية. ثم عزلوا أفضلها بواسطة مجهر القوة الذريّة، وهو جهاز قادر على التقاط الذرّات فرادى.

وجرى تشكيل قلب دوّار ذهبي، وحوامل من أنابيب نانوية، وقلبين ثابتين متقابلين حول الأنابيب النانوية المختارة باستعمال الطباعة بالحزمة الإلكترونية. وكان قد وُضع جزء ثابت في وقت سابق تحت سطح أُكسيد السليكون. ولُحم القلب الدوّار مع الأنابيب النانوية، ثم حُفر السطح بعناية لتوفير خلوص كافٍ للقلب الدوّار.

وحينما طُبِّق جهد مستمر مقداره 50 فولت على الأجزاء الثابتة، انحرف القلب الدوّار الذهبي نحو 20 درجة. وبتطبيق جهد متناوب، اهتز القلب الدوّار إلى الأمام والخلف. إن هذا المهتز، الذي يمكن أن يهتز بتردّدات الأمواج الميكرويّة الممتدة من مئات الميغا هرتز حتى الجيغا هرتز، يمكن أن يكون مفيداً في كثير من التجهيزات، وعلى وجه الخصوص، في تجهيزات الاتصالات، كالهواتف النقالة والحواسيب.

ونظراً إلى أنه يمكن وضع القلب الدوّار بأي زاوية، فإنه يمكن استخدام المحرّك في الدارات الضوئية لتحويل اتجاه الضوء (في البدَّالات الضوئية). ويمكن تدوير القلب الدوّار إلى الأمام والخلف بسرعة ليكون مولد أمواج ميكرويّة، أو يمكن للقلب الدوّار الذي يدور دورة كاملة أن يُستخدم لخلط السوائل في تجهيزات السوائل الميكرويّة(60).

## البدّالات الهاتفية

تقوم شركات مثل Lucent Technologies وCorning وAgilent Technologies بأبحاث مشابهة في مجال البدّالات الضوئية(61). فهي تسعى إلى طريقة للسيطرة على حركة الإنترنت الهائلة التنامي عبر آلاف الأميال من شبكات الألياف الضوئية. يقول أستاذ الكيمياء لاري دالتون (Larry Dalton) لدى جامعة واشنطن بسياتل: «لقد وصلنا إلى نهاية ما يمكننا فعله بواسطة الإلكترونيات الحديثة، وعلينا الذهاب إلى الحقل الفوتوني كي نستفيد من العرض الواسع لحزمة الطيف». والهدف الأساسي من ذلك، وفق قوله، هو «استخدام مواد نانوية البنية لزيادة معدّلات نقل البيانات زيادة هائلة».

في الواقع، يتفق كثير من المهندسين على أن البدَّالات الضوئية

النانوية الحجم سوف تشكِّل في النهاية أساس فقار الشبكة الضوئية برمتها. تقوم هذه البدَّالات بتبديل مسارات التيارات الضوئية، وما تحمله فوتوناتها من مليارات رزم البيانات، من دون أن تعرِّضها للتأخير الذي تسببه البدَّالات الحالية، حيث يجب تحويل الضوء إلى إشارات كهربائية والإشارات الكهربائية إلى ضوء. ويمكن لتلك التجهيزات مساعدة المهندسين على تغيير إعدادات الحركة في الشبكة في بضعة نانواتٍ من الثانية، موجِّهة مقادير هائلة من الحركة عبر آلاف الأميال من الشبكات. إذا نجحوا في ذلك، فإنهم سوف يخفِّضون تكاليف الاتصالات وفواتيرها الشهرية لجميع المستهلكين وأصحاب الأعمال(62).

وتتضمن أعمال الشركة Agilent في التقانة النانوية استخدام فقّاعات لكسر أمواج الضوء. إلا أن بدَّالاتها ما زالت في مجال المقاسات الميكرويّة. تجمع البدَّالة الفقّاعية بين ما يسمّى الأدلة الموجية الفوتونية وتقانة نفث الحبر المستخدمة في الطابعات. يسير الضوء داخل التجهيزة عبر دليلي موجة صغيرين من السليكا، وينكسر حينما يلتقي بفقاعة سائل موضوعة عند تقاطع دليل الموجة مع قناة يمثلها أخدود محفور في التجهيزة. إذا لم تكن ثمة فقّاعة عند التقاطع مع القناة، فإن موجات الضوء تمر عبرها.

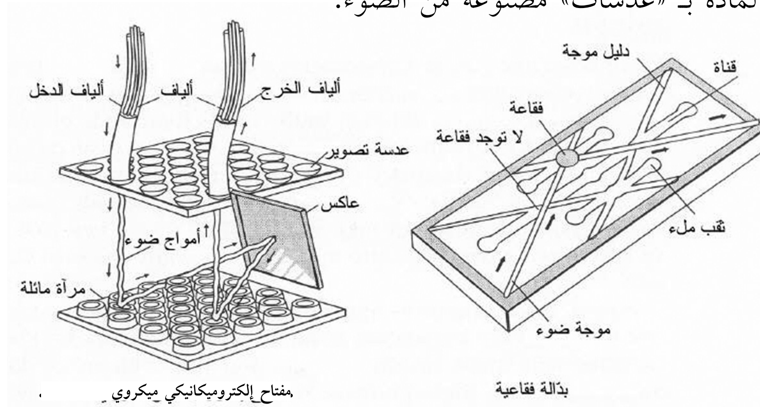
تتصف بدَّالة الفقّاعة بعدة نقاط قوة، منها صغر الحجم، وسرعة التبديل المعقولة، والأداء الضوئي الجيد. إلا أنه لا تزال ثمة عيوب فيها، وأحدها هو أنها تستخدم سائلاً يجب تسخينه، ويتدهور أداء الشبكة إذا أصبحت التجهيزة ساخنة جداً (انظر الشكل 2 ـ 16).

### مساطر وتجهيزات القياس

طوّرت الهيئة الوطنية للتقانة والمقايِس (National Institute for

Standards and Technology) (NIST) طريقة فائقة الدقة لتوضيع ذرّات الكروم على السطوح السليكونية.

تُبئِّر عدسات الطباعة الضوئية العادية الضوء بعدسات مادية، وهي ذات دقة محدودة بسبب انحراف الضوء. لكن بحث NIST قلب هذه الحالة رأساً على عقب: فنظراً إلى أنه يمكن اعتبار كل من الضوء والمادة أمواجاً، فإنه يجب أن يكون من الممكن تبئير أمواج المادة بـ «عدسات» مصنوعة من الضوء.




**الشكل 2 ـ 16: يتوقف مصير الشبكات الضوئية ذات الكفاءة العالية على تطوير بدالات بصرية نانوية المقاس. والتقانة الطليعية الملائمة لهذه البدالات هي النظم الإلكتروميكانيكية المكروية التي تستخدم مرايا قابلة للتحريك لتوجيه الأشعة الضوئية في الاتجاه المرغوب فيه. ويأمل المهندسون أيضاً بتقليص حجم البدّالة الفقاعية ليصبح نانوي المقاس. تُستخدم في البدّالة فقاعة صغيرة لتوجيه الضوء(62).**

وبالفعل، بتبئير ليزر على سطح سليكا، وتمرير ذرّات كروم حيادية عبر الحقل، أنتج علماء NIST بُنى كرومية ذات ملايين الخطوط المتوازية، أو سلسلة نقاط أنصاف أقطارها من رتبة الـ 40 نانومتر. يمكن استخدام هذه التقنية لصنع مساطر وتجهيزات قياس نانوية المقاس.

## المواد السيراميكية الكهروضغطية

هذه تقانة جديدة لتعديل بنية المواد النانوية، من أنصاف نواقل إلى نواقل أو عوازل كهربائية، محسِّنة خصائصها الكهروميكانيكية ووثوقيّتها. وعلى وجه الخصوص، تحسِّن هذه التقانة أداء المواد السيراميكية الكهروضغطية (Piezoelectric) في تطبيقات متنوّعة.

توفّر المواد السيراميكية الكهروضغطية المحسَّنة الجديدة هذه مزايا جيّدة من حيث الحجم واستهلاك الطاقة لمنظومات الإشعال والإلكترونيات وتجهيزات توليد الطاقة. ويعود الفضل في كون هذه المادة استثنائية إلى تقانة مسجّلة اختراعاً، تسمّى «ليف نانوي في مسام نانويّ»، تغيّر بنية السيراميك الكهرضغطي الميكرويّة مكوِّنة مفعولاً كهروضغطياً جيّد جداً وقوة ميكانيكية كبيرة مقارنة بالمواد السيراميكية الكهروضغطية العادية. يمكن استخدام الألياف المعدنية النانوية لتحسين خصائص عدد من المواد، إلا أن هذه السيرورة تعطي أفضل المزايا في المواد السيراميكية الكهروضغطية، وهي مادة تحوِّل الحركة (أي الاهتزازات التي تسببها تردّدات مطبقة عليها) إلى إشارة كهربائية.

يكمن أحد أهم استخدامات هذه المادة الواعدة في نظام الإشعال في السيارات والمراجل والأفران. مقارنة بنظام الإشعال العادي القائم على الوشيعة، يوفّر نظام السيراميك الكهروضغطي احتراقاً أمثلياً بسبب سلسلة نبضات الإشعال المتتالية، بدلاً من الشرارة الواحدة. وهو يؤدّي أيضاً إلى تقليص الانبعاثات الغازية وزيادة الاستطاعة نتيجةً لاحتراق الوقود بكفاءة أعلى. يُضاف إلى ذلك أنه يحتاج إلى تجهيزات إشعال أقل (لا يوجد موزّع أو وشيعة إشعال أو كابلات جهد عالٍ)، وهذا ما يُحسِّن الوثوقية ويقلِّل التداخل والتشويش الكهرومغنطيسي.

وتمكِّن الخصائص الكهربائية المحسَّنة للسيراميك الكهروضغطي

من استخدامه محوّلاً عالي الجهد يشحن مكثّفة تتحمَّل جهوداً عالية لتوليد شرارة واحدة، ومُشعل جهد عالٍ يولد سلسلة من الشرر العالي الجهد في مجال تردّدي من 0.1 هرتز حتى 100 كيلو هرتز، ومفرِّغ شحنات عالية الجهد يقوم بالتفريغ الدائم والمستقر للشحنات الكهربائية عبر فجوة.

إن عناصر السيراميك الكهروضغطي مقاومة للاهتزازات والتفاعلات مع الوقود والمحاليل وموانع التجمّد والزيت والكيميائيات الأخرى. فإذا أضيف ذلك إلى مقدرتها على التفريغ الدائم للشحنات الكهربائية، أمكن استخدامها في إشعال مزائج الوقود والهواء التي يصعب إشعالها بطرائق أخرى (على سبيل المثال مستحلبات الماء والوقود التي تحتوي على نسبة عالية من الماء).

وتتضمن التطبيقات المحتملة الأخرى للسيراميك الكهروضغطي استخدامه في تجهيزات الجراحة الكهربائية ونظم الكهرباء الساكنة. إن أجهزة الجراحة الكهربائية القائمة على السيراميك الكهرضغطي تستطيع توفير جهد عال متحكَّم به بدقة لكَيِّ النُسُج الميكرويّة المقاس بغية تقليص الأذى المرافق لعملية الكيِّ، إضافة إلى أنها تتيح للجرّاح السيطرة القصوى على العملية. وحين استخدام السيراميك الكهروضغطي في بخّاخات الكهرباء الساكنة العالية الجهد، فإنها تولِّد قُطَيرات صغيرة جداً ضرورية للتغطية المتجانسة والالتصاق السطحي القوي. إن المواد السيراميكية الكهروضغطية المحسَّنة مثالية للنظم العالية التوتر المنتجة كميّاً، ومنها النظم الكهروبصرية، وتجهيزات الاتصالات، والمكثّفات وشواحنها.

### الملابس العسكرية

افتتح الجيش الأميركي معهد تقانة الجندي النانوية (ISN) (Institute for SoldierNanotehnology) لدى معهد ماسَّاشوستس

للتقانة MIT، الذي سوف يطوّر ملابس عسكرية باستخدام مواد ذريّة الحجم. ويتوقع علماء المعهد صنع ملابس مبطَّنة ببطانة من السوائل التي تستجيب إلى الحقول المغنطيسية مكوِّنةً نظام تدريع يمكن أن يصبح أصلب في المعركة. إن الغاية من التقانة النانوية هنا هي أن تمكِّن من صنع ملابس تحمي الجندي كلياً في بيئته.

أحد أنواع الابتكارات قيد التطوير هو أن تغيِّر الملابس ألوانها وفق الحاجة لتمويه الجنود في البيئات المتغيّرة. ومن التطويرات الأخرى صنع ملابس تحتوي على مواد اتصالات راديوية محبوكة ضمن نسيجها، وخلايا وقود بحجم مذياع ترانزستوري.

ويُتوقَّع أن تقلِّص التقانة التي جرى تطويرها الوزن المعتاد للملابس والمعدات العسكرية الشخصية المعتَمدة إلى النصف تقريباً، أي من 54.5 إلى 27 كيلو غرام.

### العناقيد الذرِّية

تمثل العناقيد الذريّة لَبِنات بناء جديدة لصنع مواد وأغشية نانوية البنية. تكمن أهمية العناقيد الذريّة في خواصها التي تقع بين المجال الذرّي ومجال المواد الجَسِيمة (المادة الكثيفة). إن خواصها الإلكترونية والبصرية والكيميائية والفيزيائية تتغيّر مع تغيّر مقاسها، بسبب أَسْر الإلكترونات ضمن حيّز صغير[63]، وهي تنحو عموماً نحو خواص الحالة الصلبة عند المقاسات الكبيرة جداً. على سبيل المثال، وُجد أن الانتقال من حالة العزل الكهربائي إلى حالة النقل الكهربائي يحصل عندما يصل حجم عنقود الذرّات إلى 100 ذرّة تقريباً في عناقيد الذهب[64].

بدأت خلال السنين القليلة الماضية العناقيد الذريّة بإظهار إمكانات كبيرة لاستغلالها في عدد من المجالات. فحقيقة أن خواصها تعتمد على مقاساتها يوحي بأنه يمكن تفصيل مواد متخصِّصة لمجال

واسع من التطبيقات، من الإلكترونيات والحواسيب حتى المُحسَّات والمحفِّزات الكيميائية[65]. ويبيّن العمل القائم حالياً إمكان استخدام عناقيد الذهب لبِنات بناء للدارات النانوية المقاس، حيث يركِّز العلماء اهتمامهم في الأساس العلمي على هذه الفرص التقانية، وحيث ما زال ثمة الكثير مما يجب فعله عند هذا المستوى. إلا أنه من الواضح فعلاً أن للذهب مكانة مهمة في عالم العلم والتقانة المتوسّع في السلَّم النانوي.

## مواد التجميل

ليست الروبوتات والإلكترونيات والحواسيب أوسع التطبيقات التجارية الحالية للتقانة النانوية. بل إن أوسع تطبيقاتها يقع في مجال غير متوقع: في مواد التجميل.

يستخدم منتجو مواد التجميل جُسيْمات نانوية لتحسين مواصفات منتجاتهم. فسائل حماية البشرة من الاسمرار، على سبيل المثال، يحتوي على جُسيْمات نانوية تحجب بكفاءة الأشعة فوق البنفسجية. يُضاف إلى ذلك أن مصنِّعي مواد التجميل اكتشفوا أن وضع ألياف الكربون النانوية في طلاء الأظافر يجعله أمتن وأشد مقاومة للتقشر، وأكثر بريقاً وأطول عمراً.

## صفيفات الأسلاك النانوية

يطوِّر الباحثون، كل شهر تقريباً، طرائق جديدة لإنتاج مكوّنات دارات نانوية أصغر. وكثير من هذه الطرائق تتضمن توليد أشكال رئيسة بالطباعة بحزمة الإلكترونات ثم سك المكوّنات، ومنها أسلاك دقيقة، بقالب يُضغط على مادة مؤقتة الانصهار[66]. لكن هذه الطرائق محدودة بالدقة التي يمكن الحصول عليها بحزمة الإلكترونات، والتي تعطي حالياً أقطار أسلاك تساوي نحو 20 نانومتر تقريباً.

لكن الطريقة الحديثة التي تعطي أقطاراً تساوي نحو 8 نانومتر، أو ما يكافئ عرض نحو 80 ذرّة، تتجنب هذه المحدودية بالاستغناء عن الطباعة بالحزمة الإلكترونية برمتها. والطريقة البديلة التي اشترك في تطويرها باحثون من جامعة كاليفورنيا في لوس أنجلوس وسانتا باربرا وعلماء الشركة Caltech، تستخدم تنمية البلّورات الطبقية المنتظمة بحزمة الجُزَيئات (Molecular Beam Epitaxy) (MBE) لتشكيل صفيفات الأسلاك(67).

يجري أولاً توضيع طبقات متناوبة، سماكاتها تساوي 8 نانومتر، من زرنيخ الغاليوم وزرنيخ الألمنيوم والغاليوم بطريقة تنمية البلّورات تلك. ثم تُدوَّر الطبقات المنهاة بمقدار 90 درجة، وتُنزع طبقات زرنيخ الألمنيوم والغاليوم انتقائياً وفق الشكل المطلوب. ويُدوَّر القالب بعدئذٍ بمقدار 36 درجة أخرى. ويُعرَّض إلى تيار من شوارد معدنية تشكّل طبقة رقيقة من المعدن على كل طبقة مكشوفة من زرنيخ الغاليوم لتكوين الأسلاك.

ثم توضع الشبكة الفائقة الناتجة، ووجهها إلى الأسفل، على لاصق، ويُنزع زرنيخ الغاليوم، تاركاً صفيفة الأسلاك ملتصقة باللاصق. ويمكن، في حال الرغبة، إزالة اللاصق ببلازما الأكسجين لتحرير الأسلاك. والنتيجة هي صفيفة أسلاك يصل عددها إلى 40 سلكاً، ويبلغ طول كل منها 2 ـ 3 ميليمتر، بعرض يساوي نحو 8 نانومتر.

ثمة تطبيقات عديدة لصفيفة الأسلاك، منها أقنعة حفر لإنتاج أسلاك أنصاف نواقل لها مقاسات مشابهة. ويمكن استخدام صفيفتين متعامدتين لتشكيل صفيفة قضبان متقاطعة بكثافة وصلات تصل حتى $10^{11}$ في السنتيمتر المربع. وقد بيّن فريق العمل، إضافة إلى ذلك، أن تعليق الأسلاك عرضانياً عبر أخدود عرضه 750 نانومتر شكَّل مهتزاً ميكانيكياً مكروياً بتردّد طنين يساوي 162 ميغا هرتز.

### البطاريات النانوية

مُنِح أستاذ الكيمياء في جامعة تولسا (Tulsa)، ديل تيترز (Dale Teeters)، والطالبتان السابقتان نينا كورزوفا (Nina Korzhova) ولين فيشر (Lane Fisher)، براءة الاختراع الأميركية رقم 6586133 الخاصة بطريقة صنع بطاريات نانوية لاستخدامها في الآلات الصغيرة[68]. يمثّل هذا الاختراع سيرورة لصنع وشحن واختبار تلك البطاريات.

تتضمن الطريقة ملء مسامات غشاء مساميّ بمادة كهروليتية وتغطية المسامات بأقطاب كهربائية. تبدأ سيرورة التصنيع بوضع صفيحة ألمنيوم في محلول حمضي بوجود تيّار كهربائي، فينتج من ذلك غشاء من أُكسيد الألمنيوم. ويؤدّي انحلال المعدن إلى بنية خلية النحل. وتُملأ المسامات بعدئذٍ بمادة كهروليتية، وهي في هذه الحالة بوليمر شبه لدن. ثم تغطى المسامات من الجانبين بأقطاب مكوّنة من جُسيْمات سيراميك أو كربون.

تعطي كل بطارية ما يصل إلى 3.5 فولت. والأدوات الأساسية في سيرورة التصنيع هذه هي مجهر المسح الإلكتروني ومجهر القوة الذرّية. يُقرَّب رأس ذراع المجهر الناقل كهربائياً، والمشكَّل لهذا الغرض، ليلامس الأقطاب، وبذلك يجري شحن المدَّخرات واختبارها[68].

## المستقبل والإمكانات

وُصفت التقانة النانوية بأنها تقانة التصنيع في القرن الحادي والعشرين لسببين. **أولهما** أنها تعطي سيطرة تامة على بنية المادة. ومن الواضح أن هذه السيطرة مرغوب فيها في كل أنواع التصنيع. أما

السبب **الثاني** فهو أن التقانة النانوية توفّر هذه المقدرة بتكاليف منخفضة. والسبب الرئيس لانخفاض التكلفة هو استخدام النظم الذاتية التكرار التي تمثل جزءاً مهماً متأصلاً في التقانة النانوية.

### التحديات

ثمة كثير من الفرص التي تنتظرنا وتنتظر التقانة النانوية، إلا أن هناك كثيراً من التحدّيات أيضاً، من قبيل تلك التي حدّدتها مبادرة التقانة النانوية الوطنية (National Nanotechnology Initiative) (انظر الشكل 2 ـ 17). ويمكن عموماً تصنيف تلك التحدّيات في فئتين رئيستين (تحدّيات جوهرية وتحدّيات تقانية) يجب أولاً تجاوزهما قبل أن تتحوّل تلك الفرص إلى واقع.

- مواد نانوية البنية «بالتصميم»: أقوى وأخف وأقسى وأشد أماناً وذاتية الإصلاح.
- إلكترونيات وإلكترونيات بصرية ومغنطسيات نانوية.
- عناية صحية ومعالجة وتشخيصات متقدمة.
- سيرورات في المجال النانوي لتحسين البيئة.
- توليد وخزن فاعلان للطاقة.
- مَرْكَبات ميكرويّة لاستقصاء الفضاء ونقل الصناعة إليه.
- محسَّات حيوية نانوية لكشف الأمراض المعدية والتهديدات الحيوية.
- نقل اقتصادي آمن.
- الأمن القومي.

**الشكل 2 ـ 17: التحديات الرئيسة لمبادرة التقانة النانوية الوطنية.**

وكما هو الحال مع أي مادة، فإن الفهم الجوهري للعلاقات التوقّعية بين المعالجة والبنية والخواص يوفّر الأساس للتعامل مع المواد النانوية واستغلالها. والبحث الأساسي الذي يُجرى لتحقيق هذا الهدف سوف يوفّر مزايا شاملة لتطبيقات متعدّدة للمواد النانوية.

ولفعل ذلك علينا فهم السيرورات الفريدة التي تُصنع من خلالها المواد النانوية، والتي غالباً ما تولِّد ظواهر متنوّعة من قبيل كيمياء الغرويات (Colloidal Chemistry) وسلوك التسريب المرتبط بتشكُّل مسارات ضمن المادة تسمح بانتقال حوامل الشحنة (Percolation). ويجب تطوير وتنقيح تقنيات توصيف فاعلة ودقيقة في المستوى النانوي. ويجب تحديد خواص المكوّنات المعتمدة على الحجم. ويجب تنقيح أدوات التحليل النظري والنمذجة تنقيحاً يمكِّن من تحديد التأثير المتزامن لسلالم الطول والزمن المتعدّدة، إضافة إلى الحدود التي يصبح عندها الوصف الاستمراري للخواص الفيزيائية غير ممكن. أكثر من هذا، يجب شرح العدد الكبير من العوامل التي تؤثّر في البنية النهائية للمادة بغية تحقيق التكرار للوصول إلى الخواص ذاتها. إن تقنيات كشف أخطاء التجميع، ووسائل التصحيح في السلّم النانويّ سوف تعزِّز استخدام نهج التجميع الصعودي.

وفي المستوى التقاني، تجب مكاملة هذه المفاهيم الجديدة مع التصاميم الحالية، وتحديد تأثير المواد النانوية في تلك المكاملة. أكثر من هذا، يمكن لنُهُج التصميم أن تتغيّر، ربما بغية الاستغلال الفعلي للطرائق التي تمكِّن من تصميم المادة بالتوازي مع وضعها في الاستخدام. ويجب تطوير أدوات هندسية جديدة تمكِّن من الاستغلال الأقصى لتلك التحسينات، والتحقُّق من سلامة تلك الأدوات. ويجب استقصاء مسائل من قبيل التوقّعات بعمر المنتَج، وبتكلفة دورة حياته، وتحليل تكاليفه في مقابل مزاياه، وذلك من أجل تحديد الخيارات الممكنة. وإذا أردنا نقل النجاح في مستوى المختبرات إلى مستوى الإنتاج، فلا بد من الاستثمار في البنية التحتية، وفي قابلية التصنيع وقابلية التوسيع، استثماراً كافياً.

إلا أن أكبر التحديات التي تواجه هذا الحقل الناشئ يكمن في

أن يتمكَّن العدد الكبير من العاملين في البحث مكاملة التطويرات التي يقومون بها معاً على نحو فاعل.

## التجميع الذاتي

ثمة تحدّ هائل يواجه الباحثين في محاولتهم بناء تجهيزات ومواد جديدة في السلّم النانوي. صحيحٌ أنه قد ثبت، في كثير من الأحيان، أن من الممكن دفع الجُزَيئات لتكوِّن بُنى ضئيلة، وحتى تجهيزات عاملة، إلا أن الإنتاج الكمّي بكفاءة عالية لأي شيء في المستوى النانوي هو مسألة أخرى مختلفة تماماً. كيف سوف يكون الحال إذا قامت الملايين من لَبِنات البناء النانوية تلك بأداء المهمة الشاقة وجمَّعت أنفسها في البنية المطلوبة، متجنّبةً استخدام أجهزة تصنيع غالية ومعقدة؟

لقد غدا التجميع الذاتي القضية الأساسية في التقانة النانوية، والعلماء في العديد من المختبرات يعملون على تحويله إلى أداة هندسية نانوية فاعلة. من بعض النواحي، ليس التجميع الذاتي جديداً كلياً: فهو يحصل في الأحياء باستمرار. وقد درس العلماء طوال عقود كيمياء **الجُزَيئات الفائقة** (Supramolecular)، وتعلّموا منها ليس كيفية ترابط الجُزَيئات معاً فحسب، بل أيضاً كيف أن عدداً كبيراً منها يمكن أن يتجمّع معاً لتكوين البُنى. وفي الواقع، لقد نما مفهوم التجميع الذاتي من محاولات الكيميائيين، في المقام الأول، صنع جُزَيئات تتكاثر تلقائياً في تشكيلة معيّنة، بالطريقة ذاتها التي تشكِّل بها الجُزَيئات الحيوية أغشية خلايا معقدة.

والآن، بعد الفهم المتزايد لكيفية تفاعل الجُزَيئات والجُسيْمات الصغيرة معاً، يمكن للباحثين التوقّع بالكيفية التي يمكن لمثل هذه العناصر أن تتجمّع بها ذاتياً في بُنى أكبر وأكثر فائدة، من قبيل

الترانزستور على رقاقة نصف ناقل. يقول جورج وايتسايدس (George Whitesides)، الكيميائي لدى جامعة هارفارد والرائد في هذا المجال: «يوفّر التجميع الذاتي خطاً عاماً جداً لتصنيع بُنى من مكوّنات أشدّ ضآلة أو أكثر عدداً مما يمكن صنعه روبوتياً».

وبغية تحقيق فهم أفضل لكيفية عمل التجميع الذاتي، بيَّن وايتسايدس والعاملون معه أخيراً أن التغشية الانتقائية لسطوح صفائح ذهبية ميكرويّة بغشاء عضوي لاصق يمكن أن تدفع، ضمن شروط ملائمة، ألوفاً من تلك الصفائح لتتجمّع ذاتياً في بنية ثلاثية الأبعاد. حتى الآن، بنى فريق وايتسايدس دارة إلكترونية عاملة كبيرة نسبياً باستخدام تقنية مشابهة. وسوف تتضمن الخطوة التالية تقليص الدارة إلى السلّم الميكروي، لتكوين بُنى سليكونية ثلاثية الأبعاد أشد تعقيداً. صحيحٌ أن المكوّنات الإلكترونية الميكرويّة ليس شيئا جديداً، فهي تُصنع دائماً إلا أن تجارب وايتسايدس يمكن أن تعطي أفكاراً قيّمة عن كيفية التعامل مع التجميع الذاتي على نحو أفضل.

والطبيعة نفسها تقدّم أيضاً إلى العلماء نموذجاً لصنع تجهيزات إلكترونية ذاتية التجميع. لقد بحثَت عالمة المواد أنجلا بلتشر (Angela Belcher)، لدى جامعة تكساس في أوستن، ضمن الملايين من البروتينات المختلفة للعثور على تلك التي تتعرّف على أنواع مختلفة من المواد غير العضوية وترتبط بها. على سبيل المثال، يمكن لأحد طرفي البروتين أن يرتبط بجُسيْم معدني معيّن، ويمكن للطرف الآخر أن يلتصق بسطح نصف ناقل كزرنيخ الغاليوم. وبتوفّر المحفّزات الملائمة، يمكن للبروتينات توجيه جُسيْمات نانوية من مواد غير عضوية لتشكّل بُنى مختلفة. ويمكن أن يكون للَبِنات البناء تلك التي تحكمها البروتينات عدد كبير من التطبيقات التقانية لصنع أشياء من قبيل المحِسَّات الحيويّة الطبية أو أقراص الخزن المغنطيسية العالية الكثافة أو المعالجات الصغرية.

ويحاول الكيميائيون في كثير من المخابر أيضاً تطوير حواسيب جُزَيئية ذاتية التجميع. لكن إذا قُدِّر لهم النجاح، فلن يكون ذلك إلا بعد سنوات كثيرة.

في غضون ذلك، سوف يقوم باحثون أقل طموحاً بخطوات سريعة لاستخدام التجميع الذاتي لبناء بُنى ثلاثية الأبعاد متزايدة التعقيد، ومتزايدة الصغر، يمكن أن تكون متوافقة مع التجهيزات الموجودة حالياً. على سبيل المثال، يمكن لبعض مكوّنات سوّاقة القرص، من قبيل وسط التخزين، أن تُصنع باستخدام التجميع الذاتي، وتُصنع الأجزاء الكبيرة اللازمة لوصل التجهيزة بالعالم الخارجي باستخدام التقنيات المعتادة. «نأمل أن يتمكَّن التجميع الذاتي من أن يحلّ محل مراحل معيّنة في إنتاج المواد والتجهيزات بتكلفة منخفضة، حيث ثمة حاجة إلى السيطرة في المستوى الجُزَيئي»، هذا ما قاله المهندس كريستوفر موراي (Christopher Murray) الذي يعمل لدى قسم العلوم النانوية في مختبرات أبحاث الشركة IBM بنيويورك.

### العقد القادم

تولِّد الأدوات الجديدة تقانات جديدة، وهذه تولِّد بدورها الجيل التالي من الأدوات، في السعي نحو معرفة أوسع وتحكّم أقوى في السيرورات الفيزيائية والكيميائية. تتصف أدوات التداول المساعِدة المبنية من نوابض مرنة ضئيلة بمقدرة ممتازة على التوضيع الفائق الدقة، ولا يوجد فيها احتكاك أو ارتدادات أو خلوصات. وبتشغيلها بواسطة قوة كهرومغنطيسية أو كهروضغطية، يمكنها أن تحقّق دقة توضيع تقل عن 1 نانومتر. إن التصنيع المتكامل الواسع النطاق الناشئ سوف يتطلب دقَّات من رتبة 10 نانومتر، ويمكن

التحقق من تلك الدقات بواسطة مقياس تداخل ليزري بميْز يساوي 1.25 نانومتر. وسوف يحسِّن مقياس تداخل الأشعة السينية الميْز حتى دقّات لم يُسمع بها: أدق من 0.01 نانومتر.

ويُحقِّق الباحثون في التصنيع النانوي الآن نجاحاً في وضع «لبِنات» جُزَيئية منتقاة جيّدة الترابط على سطوح حاملة توفّر روابط كيميائية قوية بقدر كافٍ لدرء التشقّق بفعل الاهتياج الحراري. وقد جرت مكاملة تلك اللبِنات ضمن تراكيب مستقرة جديدة من قبيل الحلقات السداسية الشكل التي لا تتشكل طبيعياً. تعمل هذه الطريقة عند درجة حرارة الغرفة، وتعطي مكوّنات جُزَيئية مرنة جزئية التجميع يجري تداولها بعدئذٍ بوصفها كينونات مستقلة في معالجة لاحقة بواسطة «مجمِّع» في مستوى أعلى. ومفتاح ذلك ليس مجرد خواص البُنى النانوية الناتجة فحسب، بل سيرورة التصنيع والخيارات المتاحة لتحقيق التشكيلات المرغوب فيها في مواد المستقبل النانوية.

«سوف تتبع التقانة النانوية مسار التسجيل نفسه على أشرطة الفيديو وتقانة الأقراص المتراصة والحواسيب الشخصية. سوف يكون ثمة طيف واسع من التطبيقات التي لم يفكر أحد بها حتى الآن. وفي حين أن الإمكانات تبدو غير محدودة، كذلك تبدو المدد اللازمة لوصول كثير من التطبيقات الواقعية للتقانة النانوية إلى مرحلة التسويق. مع ذلك، ثمة منتَج يمكن أن ينزل إلى السوق قريباً هو تلفاز ذو شاشة مسطّحة مقاسه 36 أو 40 إنشاً تُستخدم فيه أنابيب كربون نانوية طوّرتها الشركة سامسونغ (Samsung). وتأمل الشركة بتحقيق ذلك في غضون سنتين أو ثلاث سنوات»، وفق قول الدكتور ميَّا ميَّابَّن (Meyya Meyyappan). «إذا تمكَّنت سامسونغ من تخفيض سعر تلفاز الشاشة المسطّحة، وأعتقد أنها تستطيع ذلك باستخدام أنابيب الكربون النانوية، فإن ذلك سوف يكون أول تسويق واسع النطاق للتقانة النانوية».

لكن المرجَّح هو أن المزايا المتوقعة للتقانة النانوية في الإلكترونيات والحوسبة والمواد المركَّبة والمُجِسَّات سوف تستغرق وقتاً، وفقاً لرأي ميَّابّن. «تحتاج التقانة كي تنضج إلى نحو 10 حتى 15 سنة بعد البدء بعجنها وخبزها في المخبر. أن تكون لديك تقانة شيء، وأن تطوِّر منتجاً شيء آخر، وثمة ما بينهما دائماً مسافة طويلة. وليس ثمة الكثير مما يستطيع الناس فعله لتقليص تلك المسافة».

## الهوامش


1. R. A.Vaia [et al.], «Nanoscience and Nanotechnology: Materials Revolution for the 21st Century,» *SAMPE J.*, 37 (6), 24-31 (2001).
2. M. Krummenacker and J. Lewis, «Prospects in Nanotechnology: Toward Molecular Manufacturing,» *Proceedings of the 1st General Conference on Nanotechnology: Development, Applications, and Opportunities*, November 11-14, 1992 (New York: John Wiley & Sons, 1995), p. 297.
3. N. Taniguchi, «The State of the Art of Nanotechnology for Processing of Ultraprecision and Ultra fine Products, 1993 Annual Meeting, The American Society for Precision Engineering, Seattle, WA, November 9, 1993,» *Precision Engrg.*, 16 (1), 5-24 (1994).
4. N. Taniguchi, «Analysis of Mechanism of Various Materials Working Based on the Concept of Working Energy,» *Scientific Papers of the Institute of Physics and Chemical Research*, 61, 3 (1963).
5. N. Taniguchi, «Atomic Bit Machining by Energy Beam Process,» *Precision Engrg.*, 7, 3 (1985).
6. N. Taniguchi, «Research and Development of Energy Beam Processing of Materials in Japan,» *Bull. JSPE*, 18, 2 (1984).
7. N. Taniguchi and T. Miyazaki, Background and Development of Nanotechnology on Advanced Intelligent Industry - Cur-

rent Status of Ultra Precision and Ultra Fine Materials Processing, presented at the 1st International Seminar on Nanotechnology, Tokyo Sciences University, Noda, Japan, 1989.

8. N. Taniguchi [et al.], *Energy Beam Processing of Materials - Advanced Manufacturing Using Various Energy Sources* (Oxford: Oxford Science Publications, 1989).
9. N. Taniguchi, Advanced Concept of Nanotechnology - Atomic Bit Processing Due to Energy Particle Beam, Proceedings of the 16th Seiken Symposium, «Nanotechnology,» Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology, Japan, 1991.
10. J. Ishikawa, ed., *Proceedings of the 2nd Workshop on Beam Engineering* (Japan: Kyoto University, 1991).
11. B. C. Crandall and J. Lewis, «Nanotechnology - Research and Perspectives,» *Papers from 1st Foresight Conference on Nanotechnology,* (Cambridge, MA: The MIT Press, 1992), p. 381.
12. H. Gleiter, *Adv. Mater.*, 4, 474 (1992), (b) R. Birringer and H. Gleiter, in: *Encyclopedia of Materials Science and Engineering, R W. Cahn, ed.* (Oxford, U. K: Pergamon Press, 1988), Suppl. Vol. 1, p. 339.
13. R. W. Siegel, *Nanostruct. Mater.*, 3, 1 (1993).
14. R. W. Siegel, *Mater. Sci. Eng.*, B19, 37 (1993).
15. K. Ichinose [et al.], *Superfine Particle Technology* (London: Springer-Verlag, 1992); Q. XU and M. A. Anderson, *J. Am. Ceram. Soc.*, 77 (1939, 1994); K. E. Gonsalves [et al.], *Adv. Mater.* 6, 291 (1994), and B. H. Kear and McCandlish, *L. E, J. Adv. Mater.*, 10, 11 (1993).
16. M. J. Tracy and J. R. Groza, *Nanostruct. Mater.*, 1, 369 (1992); K. Higashi [et al.], *Nanostruct. Mater.*, 26, 191 (1992).
17. W. Buhro, *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.* 210, 20 (1995), and J. A. Haber [et al.], *M. S., Adv. Mater.*, 8, 163 (1996).
18. B. H. Kear and L. E. McCandlish, *Nanostruct. Mater.*, 3, 19 (1993); L. E. McCandlish and R. S. Polizzotti,» *Solid State Ionics*, 32/33, 795 (1989).
19. K. C. Kwiatkowski and C. M. Lukehart, «Nanocomposites Prepared by Sol-Gel Methods: Synthesis and Characterization,» in: H. S. Nalwa, ed., *Handbook of Nanostructured Ma-*

*terials and Nanotechnology* ([n. p.]: Academic Press, 2002), Chap. 2, pp. 57-91.
20. J. Frenkel, *J. Phys.* (USSR) 8, 386 (1945).
21. C. Herring, *J. Appl. Phys.*, 21, 301 (1950).
22. R. H. Rhodes, *J. Am. Ceram. Soc.*, 64, 19 (1981).
23. G. Skandan, H. Hahn and J. C. Parker, *Scr. Metall.*, 25, 2389 (1991).
24. E. J. Gonzalez and G. J. Piermarini, «Low-Temperature Compaction on Nanosize Powders,» in: Nalwa, ed., *Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology*, Chap. 3, pp. 93-127.
25. T. P. Sidiki and Sotomayor C. M.Torres, «Silicon-Based Nanostructures,» in: Nalwa, ed., *Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology*, Chap 10, pp. 387-443.
26. *Machine Design* (22 May 2003), p. 41.
27. K. K. Likharev, *Electronics below 10 nm: Nano and Giga Challenges in Microelectronics* (Amsterdam: Elsevier; 2003).
28. K. K. Likharev [et al.], CrossNets; High-Performance Neuromorphic Architectures for CMOL Circuits, Sixth Molecular-Scale Electronics Conf., Key West, FL, December 2002, New York Academy of Sciences.
29. R. W. Siegel and J. Eastman, «Creating Materials with Nanophase Technology, Ceramic Industry» (January 1994), pp. 31-33.
30. L. E. McCandlish, «Chemical Processing of Nanostructured Materials,» *Mat. Tech.*, 8(9/10), 193-197 (1993).
31. T. D. Xiao [et al.], *J. Mat. Sci.*, 28, 1334 (1993).
32. C. Walker, C. Borsa and R. Todd, *Nanocomposites, Ceramic Technology International* (London: Sterling Publications Ltd., 1995), pp. 46-49.
33. H. Shinbara, Development of Nano Composite Ceramic Structural Materials, Univ. of Osaka, July 1992, pp. 1-10. Selected papers from: *Centennial Issue of Ceramic Society of Japan - Science and Technology* (May 1992), p. 98.
34. M. Nawa, T. Sekino and K. Niihara, «Fabrication and Mechanical-Behavior of $AI_2O_3$/Mo Nanocomposites,» *J. Mater. Sci.,* 29(12), 3185-3192 (1994).
35. A. Rousset, «Alumina-Metal (Fe, Cr, Fe 0.8 CrO.2) Nanocomposites,» J. *Solid State Chem.*, III (l), 164-171 (1994).

36. Chen, L., Goto, T., and Hirai, T., Preparation of SiC-W2C Nanocomposite Powders by Chemical Vapour Deposition of the $SiH_4$-$CH_4$-$WF_6$-$H_2$ System, J. Mater. Sci., 28 (20), 5543-5547, 1993.
37. R. Hillel, M [et al.], «Microstructure of Chemically Vapour Codeposited SiC- TiC-C Nanocomposites,» *Mater. Sci. Eng.,* A168 (2), 183-187 (1993).
38. J. Zhao [et al.], «Mechanical Behavior of Alumina Silicon Carbide Nanocomposites,» *Am. Ceram. Soc. J.*, 76 (2), 503-510 (1993).
39. K. Niihara and A. Nakahira, «Structural Ceramic Nanocomposites,» in: *Ceramics: Toward the 21st Century*, The Ceram. Soc. of Japan, 1991, pp. 404-417.
40. K. Niihara, A. Nakahira and T. Sekino, «New Nanocomposite Structural Ceramics,» *MRS Symp. Proc.*, vol. 286, and S. Komameni, J. C. Parker, and G. J. Thomas (eds.), *Nanophase and Nanocomposite Materials*, December 1-3, 1992, pp. 405-412.
41. J.-P. Hirvonen [et al.], «Structure, Mechanical Properties, and Oxidation Behavior of Nanolayered MoSi2/SiC Coatings,» *MRS Symp. Proc.*, vol. 286, Nanophase and Nanocomposite Materials, S. Komarneni, J. C Parker, and G. J. Thomas (eds.) December 1-3, 1992, pp. 373-378.
42. R. Roy, «Nanocomposites: Retrospect and Prospect,» *MRS Symp. Proc.*, vol. 286, Nanophase and Nanocomposite Materials, S. Komarneni, J. C. Parker, and G. J. Thomas, eds., December 1-3, 1992, pp. 241-250.
43. D. Hoffman, S.Komarneni and R. Roy, «Preparation of a Diphasic Photosensitive Xerogel,» *J. Mat. Sci. Lett.*, 3, 439-442 (1984).
44. «Preparation of Nanocomposites,» *NERAC, Inc.*, Tolland, CT, 96 (22), 3 (1996).
45. Rand Chattopadhyay and K. Nagarajan, « Intermetallic Ti2Ni/TiNi Nanocomposite by Rapid Solidification,» *Acta Metal Mater.*, 42 (3), 947-958 (1994).
46. M.Takeyuma and C. T. Liu, *J. Mater. Res.*, 5, 1189 (1990).
47. V. Provenzano and R. Holtz, «Production of Nanocomposites with Enhanced Properties for High Temperature Applications, IH, April 1994, pp. 47-53.

48. L. Carroll, M. Sternitzke, B. Derby, «SiC Particle Size Effects in AluminaBased Nanocomposites,» *Acta Materialia*, 44 (11), 4543-4552 (1996).
49. I. Levin [et al.], *J. Am. Ceram. Soc.*, 78, 254-256 (1995).
50. S. Jiao, M. L. Jenkins and R. W. «Davidge, Interfacial Fracture EnergyMechanical Behaviour Relationship in $Al_2O_3$ 1 SiC and $Al_2O_3$/TiN Nanocomposites,» *Acta Materialia*, 45 (1), 149-156 (1997).
51. R A. Vaia, Polymer Nanocomposites, AFRL Materials and Manufacturing Directorate, Nonmetallic Materials Division, AFRL Technology Horizons, September 2002, pp. 41-42.
52. U.S. Patent 5747560, Melt Process Formation of Polymer Nanocomposite of Exfoliated Layered Material, 1998.
53. U.s. Patent 5385776, Nanocomposites of Gamma Phase Polymers Containing Inorganic Particulate Material, 1995.
54. E. Giannelis, Go Lighter with Solvent-Free Silicate-Polymer Composites, High- Tech Materials Alert, May 10, 1996, Englewood, NJ: Tech Insights, Inc., p.2.
55. J. Lichtenhan, Promising but Difficult Silsesquioxane Becomes Viable, HighTech Materials Alert, May 10, 1996, Englewood, NJ: Tech Insights, p. 3.
56. B. P. Rice, C. Chen and L. Cloos, «Carbon Fiber Composites: OrganoclayAerospace Epoxy Nanocomposites,» *SAMPE J.*, Part I, 37 (5), 7-9 (2001).
57. C. Chen and D. Curliss, «Resin Matrix Composites: Organoclay-Aerospace Epoxy Nanocomposites,» *SAMPE J.*, Part II 37 (5), 11-18 (200l).
58. M. D. Alexander, Jr., C.-S. Wang and P. Meltzer, Jr., Electrically Conductive Polymer Nanocomposite Materials, AFRL Materials and Manufacturing Directorate, Air Expeditionary Forces Technologies Division, and Anteon Corp., AFRL Technology Horizons (September 2002), pp. 44-45.
59. A. Goel, «Versatile, Cost-Effective, Strongly Adherent, Highly Stable, WearResistant Coatings,» *Mat. Tech.*, 8 (5/6), 85-93 (1993).
60. Nanotechnology - Motors, NASA Tech Briefs Insider, http:/ link.abpi.net/ l.php?20030729A5, Accessed 29 July 2003.
61. «AFRL Technology Horizons,» (December 2001), p. 3.

62. L. Bruno, «Bright Lights, Red Herring,» (15 June and 1 July 2001), pp. 46-58.
63. M. Moskovits, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, 42, 465-499 (1991).
64. G. K. Wertheim, *Phase Transitions*, 24-26, 203 (1990).
65. S. N. Khanna and P. Jena, *Phys. Rev. Lett.*, 69, 1664 (1992).
66. *The Industrial Physicist* (December 2002-January 2003), p. 9.
67. *Science*, 300, 112 (2003).
68. U. S. Patent 6586133 at http:/ /www.uspto.gov.
69. M. C. Roco, *Nanobriefs*, 5-6 (2003).

# المراجع

Brave New Nanoworld, <http://www.ornl.gov/ORNLReview/rev32_3/brave> .htm.

Freer, R. «Nanoceramics.,» *British Ceramic Proceedings*: no. 51, 200, 1993.

Froes, F. H. and C. Suryanarayana. «Nanocrystalline Metals for Structural Applications.,» *JOM*: 41 (6), 12-17, 1989.

Froes, F. H. [et al.]. «Nanostructure Processing for Titanium-Based Materials.,» *JOM*: 44 (5), 26-29, 1992.

Lian, J., B. Baudelet and A. A. Nazarov. «Model for the Prediction of the Mechanical Behaviour of Nanocrystalline Materials.,» *Mater. Sci. Eng.*: AI72 (1-2), 23-29, 1993.

Lowe, T. «The Revolution in Nanometals.,» *AM&P:* January 2002, pp. 63-65.

Manthiram, A., D. L. Bourell and H. L. Marcus. «Nanophase Materials in Solid Freeform Fabrication.,» *JOM*: 45 (11), 66-70, 1993.

*Mat. Tech.*: 8, 181-192, 1993.

Mayo, M. J., D. C. Hague and D.-J. Chen. «Processing Nanocrystalline Ceramics for Applications in Superplasticity.,» *Mater. Sci. and Eng.*: A166, 145-159, 1993.

Reihs, K. «Nanostructures in Industrial Materials.,» *Thin Solid Films*: 264 (2), 135-140, 1995.

Shull, R. D. «Nanometer-Scale Materials and Technology.,» *JOM*: November 1993, pp. 6061.

Surinach, S., J. Malagelada and M. D. Baro. «Thermodynamic Properties of Nanocrystalline $Ni_3AI$-Based Alloys Prepared by Mechanical Attrition.,» *Mater. Sci. and Eng.*: A168, 161-164, 1993.

Tolles, W. M. Nanoscience and Nanotechnology, Naval Research Laboratory, NRL-MR-I003-92-6989, May 1992.

Vendange, V. and Colomban, P. «Elaboration and Thermal Stability of (Alumina, Aluminosilicate/Iron, Cobalt, Nickel) Magnetic Nanocomposites Prepared through a Sol-Gel Route.,» *Mater. Sci. Eng.*: A168 (2), 199-203, 1993.

# 3

# المواد المركَّبة كربون/كربون

## تقديم

من المعروف جيداً أن عنصر الكربون يتصف بخواص استثنائية، ومنها قابليته أن يجمع بين الفروع الرئيسة الثلاثة لعلم المواد: البوليمرات والسيراميكات والمعادن. وهو يشكّل روابط بين ذريّة قوية مع نفسه تؤدّي إلى الكيمياء العضوية والبوليمرات. وهذا العنصر، بكلتا صيغتيه المتغايرتين، الألماس والغرافيت، مقاوم جداً للحرارة ويبقى صلباً عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة انصهار معظم السيراميكات، في حين أن لصيغة بلورة الغرافيت خواص نقل كهربائي وحراري كتلك التي للمعادن.

صحيحٌ أن للبنية البلّورية الرباعية الوجوه المعروفة بالألماس تطبيقات تقانية وصناعية، إلا أن هذا الكتاب معنيّ بالكربون ببنيته السداسية أو بصيغة الغرافيت المتبلور. بعيداً عن الألماس، فإن جميع صيغ الكربون، ومنها الفحم وفحم الكوك والسخام وسناج الكربون وألياف الكربون، وحتى الفلّرينات[1] المكتشفة حديثاً، ليست إلا صيغة محرَّفة من صيغة الغرافيت. وقد اقتُرح المصطلح **الكربون الصلب** لكي يشتمل على الأنواع الكثيرة المختلفة[2]، إلا أنه لم يلقَ قبولاً واسعاً.

يمكن للتمييز بالمصطلح بين الكربون والغرافيت أن يكون مربكاً، خصوصاً بالنسبة إلى الداخلين الجدُد إلى الحقل. من الواضح أن **الكربون** هو العنصر، وكل ما يسمّى غرافيت يتألف من الكربون، إلا أن المصطلح **غرافيت** يجب أن يُطلق حصراً على ذرّات الكربون ذات البنية السداسية التامة فقط. لكن هذه البنية السداسية التامة نادراً ما يمكن الحصول عليها في الغرافيت المصنَّع، الذي ليس إلا تكتلاً غير متجانس من بلّورات شبه تامة ممتزجة مع مناطق أقل انتظاماً. مع ذلك، أصبحت الكلمة **غرافيت** مقبولة في الاستخدام العام للدلالة على ذرّات الكربون التي تقترب من البنية البلّورية التامة. وعلى نحو مشابه، الكلمة **غرفتة** تُستخدم للدلالة على المعالجة الحرارية للكربون عند درجات حرارة عالية بهدف الحصول على بُنى شبيهة بالغرافيت. أما مدى ما يمكن الحصول عليه، فيختلف كثيراً اعتماداً على بنية الكربون الابتدائي، وقد أدّى ذلك إلى تصنيف ذرّات الكربون بوصفها **مغرفتة** أو **لامغرفتة**[*][3]. إن هذا التمييز مبسّط جداً، وهناك طيف كامل من قابلية الغرفتة ضمن مجموعة المواد الكربونية الأولية الممكنة[4][5]. لذا من المفضل استخدام العبارة **معالجة حرارية** بدلاً من غرفتة، إلا إذا كان معروفاً أن بنية غرافيت شبه تامة سوف تتحقق.

[إن الهوامش المشار إليها بـ (*) هي من وضع المترجم].

(*) يستخدم أحياناً التعبيران **ناعم** و**خشن** للكربون لإعطاء المعنى نفسه.

## الغرافيت والمواد المركَّبة كربون/ كربون

وُجد الكربون، بصيغته البلّورية ذات السطوح السداسية شبه التامة، الذي يُسمّى عادة الغرافيت المتعدّد البلّورات، استخدامات صناعية كثيرة التنوع، وثمة عدد هائل من أنواعه المتفاوتة المواصفات

المتاحة من منتجين في كافة أنحاء العالم. أما استخداماته فتقوم على التراكيب الاستثنائية للخواص المغرية التي يتصف بها. وناقليته الكهربائية الجيدة تجد استخدامات في الأقطاب الكهربائية وفي مسافر التماس في المحرّكات الكهربائية، وتجد ناقليته الحرارية الجيدة استخداماً في المبادلات الحرارية، ويجد خموله الكيميائي ومقاومته لدرجات الحرارة العالية استعمالاً في سيرورات سبك المعادن، وتجد قابليته للتزليق المتأصّلة فيه استخداماً في مانعات التسرّب وقوالب سحب الأسلاك.

وبرغم هذه الاستخدامات المتعدّدة الأوجه والخواص المغرية، يعاني الغرافيت عيباً حقيقياً، هو ضعفه الميكانيكي. عادة، تكون مقاومة الشدّ الخاصة بالغرافيت المتعدّد البلّورات العالي الجودة عند درجة حرارة الغرفة من رتبة 35 ميغا باسكال، في حين أن مقاومة معدن هش (حديد الصب) تساوي 135 ميغا باسكال. وعند درجة حرارة تساوي 2500 مْ، تزداد مقاومة الغرافيت للشدّ لتصبح 55 ميغا باسكال، في حين أن معظم المعادن تكون قد انصهرت عند تلك الدرجة. لذا، فإن أي محاولة للاستفادة من مقدرته الحرارية في الأعمال الإنشائية تستدعي استخدام مقاطع سميكة ضخمة كي تتحمَّل الأثقال الكبيرة. أكثر من ذلك، تساوي مقاومة الضغط في الغرافيت عند درجة حرارة الغرفة عادة 90 ميغا باسكال، وتزداد حتى 180 ميغا باسكال عند 2500 مْ، لذا يجب أن تكون التصاميم الإنشائية استثنائية للاستفادة من مقاومة الضغط العالية تلك. من ناحية أخرى، يمكن استخدام الغرافيت مقترناً بمادة بناء قوية، لكن ثقيلة، من قبيل الفولاذ الذي يدعمه ميكانيكياً. إن تلك العيوب الميكانيكية تكون جلية، على وجه الخصوص، في استخدامات الغرافيت الجوية والفضائية، التي لولاها لكانت كثافته المنخفضة ومقاومته للحت عند درجات الحرارة المرتفعة ومقاومته الحرارية الممتازة لا تقدَّر بثمن. لكن نظراً إلى

محدودية الوزن التي تفرضها البيئة على المكوّنات الجوية والفضائية، فإنه لا يمكن استخدام مفاهيم التصميم الثقيل، ولا يمكن أيضاً للغرافيت أن يُجهَد دائماً في حالات الضغط. لذا يجب اللجوء إلى طرائق أخرى للتعامل مع مقاومة الشد المنخفضة هذه.

يعود مفهوم استخدام التقوية بالألياف، بغية تحسين مقاومة الغرافيت للشدّ، إلى بداية ستينيات القرن العشرين. وقد تعزَّز ذلك المفهوم بتوفّر ألياف الكربون، وبازدياد الاهتمام باستخدام المواد المركَّبة المقوّاة بالألياف، وعلى وجه الخصوص، الراتنجات الحرارية التصليد المقواة بالألياف الزجاجية. بذلك ظهرت طائفة جديدة من المواد سُمِّيت المواد المركَّبة من الكربون المقوّاة بألياف الكربون، أو المواد المركَّبة كربون/كربون (ك/ك). وكان أمراً استثنائياً في ذلك الوقت أن تُستخدم المادة نفسها (وإنْ بصيغ مختلفة) لكل من الألياف والمادة الحاضنة. ومنذئذٍ، ظهرت بضع مواد مركَّبة متجانسة أخرى من قبيل كربيد السليكون/ كربيد السليكون والألومينا/ ألومينا، إلا أن مواد الـ ك/ك (كربون/ كربون) هو أكثرها شيوعاً ونضجاً. إن جميع هذه المواد المركَّبة هي استجابة إلى الحاجة الملحة إلى تمتين المواد الهشة أصلاً، لكن المقاومة للحرارة، وذلك بتقويتها بالألياف.

إنه لمن فضل القول إن الـ ك/ك ليست مجرّد مادة، بل هي مفهوم نجم عنه طيف واسع من المواد المفصَّلة لتلائم تطبيقات مختلفة، تماماً كالغرافيت الذي توجد منه درجات مختلفة للأغراض المختلفة. إن الهدف المشترك من مواد الـ ك/ك المركَّبة هو الاستفادة من الخواص الجيدة الكثيرة للغرافيت، وذلك بضمِّها إلى الخواص الميكانيكية للمواد المقوّاة بالألياف. لقد تم الحصول على ك/ك تصل مقاومته للشدّ إلى 900 ميغا باسكال[6]، وهذه تساوي نحو 30 ضعفاً من مقاومة غرافيت عالي الجودة.

من المفضّل النظر إلى مواد الـ ك/ ك المركَّبة، التي سمّيت بهذا الاسم لأنها تجمع بين ألياف التقوية الكربونية وحاضنة كلها من الكربون، على أنها جزء من فئة واسعة من المواد المركَّبة القائمة على ألياف الكربون التي تستفيد من خفة وزن الألياف الكربونية ومقاومتها وجساءتها الاستثنائيتين. إلا أن المزايا الإنشائية للتقوية بألياف الكربون، إضافة إلى المقاومة الحرارية العالية التي تتصف بها منظومة المواد التي كلها من الكربون، تجعل الـ ك/ك أكثر المواد ملاءمة لتطبيقات البيئات القاسية، من قبيل الدخول من الفضاء إلى جو الأرض، وعوادم محرّكات الصواريخ الصلبة، وأقراص مكابح الطائرات العسكرية والتجارية الثقيلة. يُضاف إلى ذلك أن استقرار أبعادها، ونفوذيتها لليزر، وتسريبها الغازي الضئيل، تجعلها مثالية لتطبيقات الفضاء المختلفة.

لا توفّر الغرافيتات الجَسِيمة المختلفة هذه الخواص الميكانيكية والحرارية لسببين: **(1)** الغرافيتات حسّاسة جداً للتصدع، ولذا فهي هشة، **(2)** وهي صعبة التصنيع لتكوين قطع كبيرة بأشكال معقّدة. لكن يمكن تجاوز هاتين العقبتين، إلى حد بعيد، باستخدام «مفهوم الطورين في كل من بنية المادة ومقاومتها»[7].

في منظومات المواد المعتادة ذات الطورين، أو المركَّبة، يُحمَل طور تقوية عالي مقاومة الشدّ، وذي معامل يونغ كبير، مكوَّن من قطع منفصلة، ضمن طور مستمر ذي معامل يونغ صغير. ومثال ذلك ألياف غرافيتية ضمن حاضنة راتنجية حرارية التلدُّن. إن الإجهاد في البنية المركَّبة المقوّاة بالألياف المستمرة طولانياً ينتقل تناسبياً إلى معاملي يونغ للطورين المكوّنين للمادة، ويتوزع عليهما وفقاً لنسبتيهما الحجميتين. لذا، فإن الألياف ذات معامل يونغ الكبير سوف تكون هي الحوامل الرئيسة، وسوف يتغيّر شكل الحاضنة تحت الحمل لتوزِّع معظم الإجهادات على الألياف، وذلك إضافة إلى مهمتها

بوصفها رابطاً لمكوِّنَي المادة المركَّبة. وفي الوقت نفسه، ونظراً إلى عزْل ألياف الكربون الهشة عن بعضها، فإن إمكان انتقال تلف يحصل في ليف ما إلى الألياف الأخرى، وحصول انهيار كارثي ينعدم عملياً.

إن إحدى المزايا الرئيسة الأخرى للمواد المركَّبة هي أنها تتيح بناء أشكال هندسية معقدة على نحو يمكِّن من توجيه مقادير مختلفة من الألياف في اتجاهات معيّنة في البنية النهائية حيث توجد الأحمال الكبيرة. وثمة شيء على صلة وثيقة بعملية «تفصيل» المواد المركَّبة هذه وفق الرغبة هو أن تقانة ألياف الكربون تمكِّن من استغلال جساءة المستوى القاعدي الاستثنائية (ومقاومة الشد من حيث المبدأ، مع أن هذا ما زال بعيداً جداً عن التحقيق عملياً) لذرّات الكربون المربوطة $sp^2$، أي إن الألياف لا تكون متناحية، بل إن مستوياتها القاعدية الغرافيتية تكون متجهة على نحو مميز في اتجاه محور الليف.

في تطبيقات مواد الألياف الكربونية ذات درجات الحرارة العالية جداً، أي التي هي فوق 2000 مْ، فإنه من الضروري استخدام حاضنة كربونية، حتى لو كانت مدة التعرض للحرارة العالية قصيرة. لكن على غرار الألياف، الحاضنة الكربونية هشة أيضاً. وعندما يكون رابط الليف والحاضنة قوياً جداً في الـ ك/ك، كثيراً ما تُشاهد صدوع هشة. وتفسير ذلك هو أن الرابط القوي يسمح بظهور إجهادات تصديع قوية عند الملتقى بين الليف والحاضنة. ويمكن للتصدّعات التي تبدأ في الليف أو الحاضنة أن تنتشر عبر المادة المركَّبة. لكن إذا كان الملتقى بين الليف والحاضنة ضعيفاً جداً، أو كان تصدّعه ميكرويّاً، فإنه يمكن للصدع الرئيس المنتشر عند تلك الملتقيات أو التصدعات الضعيفة أن ينحرف. وهذه هي نظرية كوك ـ غوردون[8] (Cook-Gordon) لتقوية الأجسام الصلبة الهشة، التي تنص، بالتحديد، على أنه إذا كانت نسبة القوة اللاصقة في الملتقى، إلى قوة الارتباط العامة

للجسم الصلب، ضمن المجال المناسب، تولَّدت زيادة كبيرة في مقاومة ومتانة الجسم الصلب، التي لولاها لكان هشّاً. لذا فإن مدى الاستفادة من مقاومة الليف للشدّ في مادة مركَّبة ذات حاضنة هشّة من قبيل الـ ك/ك، يعتمد على التحكّم في بنية الحاضنة وفي الملتقيات بينها وبين الألياف.

تُعدُّ مواد الكربون المقوّاة بألياف الكربون مجموعة من المواد الشديد التخصُّص. ويمكن النظر إليها على أنها تطوير لطائفة البوليمرات المقوّاة بألياف الكربون التي أصبحت كثيرة الشيوع في الهندسة الحديثة. ومنذ ستينيات القرن العشرين، ظهر على المسرح عدد كبير مما يسمّى «مواد متقدمة». والـ ك/ك، بلا ريب، هو أكثر تلك المنتجات نجاحاً من حيث تعدّد وتنوّع تطبيقاته. في حقل سباق السيارات فورمولا 1، على سبيل المثال، لم يكن من الممكن تحقيق مستوى الأداء الحالي من دون استخدام مكابح وقوابض الـ ك/ك. ومع أن مزايا هذه المواد جلية، فإنه لم يتم الوصول إلى إمكاناتها الكاملة، ولن يتم ذلك قبل حل مشاكل تكاليف إنتاجها المرتفعة ومقاومتها المنخفضة للأكسدة على النحو الملائم.

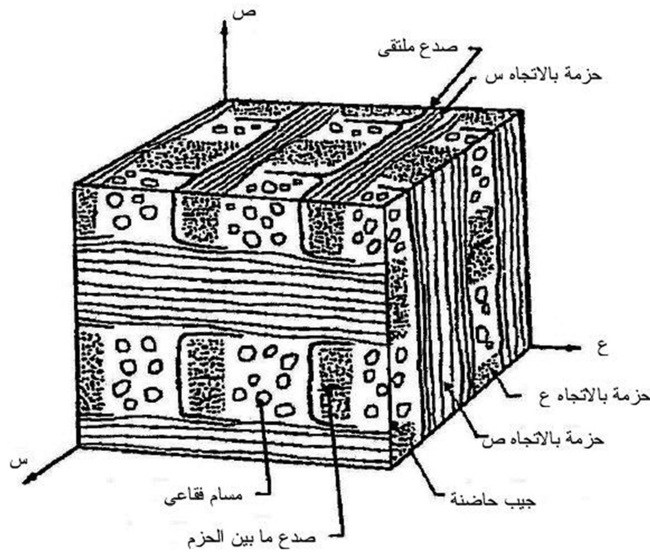
استُخدمت مواد الـ ك/ك أول مرة في الصناعة الفضائية بوصفها بديلاً من الغرافيت المتعدّد البلّورات في رؤوس الصواريخ. وكان ذلك بسبب تلف الغرافيت نتيجة التسخين الشديد والاهتراء في أثناء دخول الصاروخ جو الأرض عائداً من الفضاء. لقد تحسَّنت الخواص الحرارية والميكانيكية للمواد الكربونية تحسّناً ملحوظاً بسبب إضافة الألياف المقوية إلى الأجسام الكربونية، وهذا ما مكَّن من استخدام الـ ك/ك بنجاح في التطبيقات الهندسية المختلفة، ومنها تطبيقات عسكرية وجوية فضائية وصناعية وتجارية وطبية.

تُصنع مواد الكربون المقوّاة بألياف الكربون من عنصر الكربون الصناعي الصافي. إن الكربون مادة صلبة فريدة يمكن أن تُصنع بحيث تمتلك أوسع تنوّع من البُنى والخواص. وهذا ما يجعل مواد الـ ك/ك مواد وسيطة، فهي تتصف بخواص مأخوذة من المعادن أو البوليمرات أو السيراميكات أو الزجاج[9]. ويمكن تفصيل مواد الـ ك/ك، من حيث كونها مواد هندسية، لتمتلك خواص مصمّمة لتلائم حاجة المستخدم.

تتكوَّن مادة الـ ك/ك المركَّبة عموماً من حاضنة كربونية مقوّاة بألياف كربون على شكل خيوط شُعَيْرية مستمرّة، أو نسيج، أو حُبيْبات أو قطع مفرومة، أو على شكل نسيج ثلاثي الأبعاد[10]. وقد جرى استخدام كثير من التراكيب الإنشائية المختلفة لتقوية مواد الـ ك/ ك. من تلك التراكيب[11] الألياف العشوائية، والألياف الوحيدة الاتجاه، والخيوط المجدولة، والنُسُج الطبقية الثنائية الأبعاد، والنُسُج المثقبة لتحقيق خواص قص جيّدة في ما بين الصفائح، والبُنى الثلاثية الأبعاد المتعامدة بالإحداثيات الديكارتية أو الأسطوانية، أو المنسوجات المتعدّدة الاتجاهات المصمّمة لتحسين الخواص في المواضع البعيدة عن المحور ولجعل الفراغات التي تحصل في مواضع تقاطع الشُعَيرات أعظمية. إن جمع الحاضنات الراتنجية إلى ألياف الكربون، إضافة إلى التراكيب الإنشائية المختلفة، يُنتِج خواص استثنائية تميّز هذه الفئة من المواد. من تلك الخواص المتانة الممتازة، ومقاومة تعب جيّدة، ومقاومة حرارة كبيرة، وتقلُّص أبعاد صغير، وعامل تمدّد حراري منخفض، وسعة خزن حراري كبيرة، ومقاومة كيميائية جيدة.

إن البنية النسيجية المتعامدة الخشنة لحزم الشُعَيرات الكبيرة نسبياً، مع اللاتناحي الشديد للحاضنة الغرافيتية، تقوم بدور رئيس في تحديد خصائص المادة المركَّبة وسلوكها في المستوى الميكرويّ.

والعاقبة المهمة لهذا اللاتناحي هي شبكة تصدّع ميكرويّ تنجم عن الإجهاد الحراري أثناء التصنيع[11]. يبيّن الشكل 3 ـ1 رسماً ثلاثي الأبعاد لسمات ميكانيكية صغيرة في مركَّب ك/ك[12]. إن هذه التعقيدات الميكرويّة البنية تخرق الافتراضات الجوهرية الخاصة بالاستمرارية التي يقوم عليها ميكانيك التصدّع. والدراسات القليلة المعلنة التي حاولت توصيف مقاومة مواد الـ ك/ك للتصدّع تشهد على عدم ملاءمة طرائق ميكانيك التصدع المعهودة لهذا التوصيف.




**الشكل 3 ـ 1: رسم توضيحي ثلاثي الأبعاد لمادة مركَّبة يُري بعض السمات الميكانيكية الصغيرة.**

وبرغم الخواص الكثيرة الجيدة التي تتصف بها مواد الـ ك/ك، تبقى تلك المواد فئة من المواد التي يصعب جداً إجراء اختبار تصدّع عليها[13][14]. فالسلوك التصدّعي لمواد الـ ك/ك المصنوع من حاضنة كربون مقوّاة بألياف كربونية سلوك معقّد. والتباين الشديد في حقول

قوة كثير من المواد يسبب بعثرة واسعة في مقاومتها للتصدعات ومتانتها على المدى الطويل. لذا لا بد من إيجاد نهج جديد لتقييم مقاومة التصدّع طوال مدة حياة تلك المواد.

## ألياف الكربون ومواد الحاضنة

من البدهي أن مواد الـ ك/ك لا يمكن أن توجد من دون ألياف الكربون التي هي بلا ريب أهم المكوِّنات التي تؤدي الدور الرئيس في كثير من خواص مواد الـ ك/ك.

تتأثّر مواد الـ ك/ك كثيراً بكل من حاضناتها وأليافها، ويتطلب تصنيعها فهماً جيداً للعلاقة الداخلية بين الألياف والحاضنة. واختيار المواد الملائمة لإنتاج هذه المواد له تأثير كبير في تقنيات معالجتها، وفي بنيتها النهائية أيضاً.

### ألياف الكربون

صحيحٌ أن ألياف الكربون مشهورة الآن بأنها مواد ذات مقاومة كبيرة للشدّ، إلا أن الاهتمام بالألياف الأولى كان بسبب خواصها الكهربائية. ويبدو أن الاكتشاف الشهير لفتيل الكربون، المنسوب إلى توماس إديسون (Thomas Edison) الذي حصل في عام 1880[15]، كان قد سُبق بعرض قام به جوزيف سوان (Joseph Swan) لمصباح متوهج ذي فتيل كربوني في عام 1878[16].

لقد تحققت تحسينات مختلفة في مصابيح الكربون خلال العشرين حتى الثلاثين سنة اللاحقة، لكن بحلول عام 1910، طغى التنغستين في المصابيح على فتائل الكربون، ولم تلقَ ألياف الكربون

بعدئذٍ إلا اهتماماً قليلاً. لكن بحلول منتصف خمسينيات القرن العشرين، ظهر الاهتمام بها ثانية، حينما تطلبت تقانة الصواريخ ألياف تقوية أخفّ وزناً وأعلى مقاومة للحرارة من القماش أو الزجاج.

لُخِّصت خواص الألياف الملائمة لتكوين ألياف الكربون بما يأتي[17]:

1 ـ أن تكون سليمة بقدر يكفي لتماسك الليف خلال جميع مراحل معالجته.

2 ـ ألا تنصهر.

3 ـ يمكن استخدامها لتصنيع منتجات كربونية بكميات كبيرة.

4 ـ يمكنها أن تؤدّي إلى اصطفاف بلّوري جيد.

5 ـ أن تكون متوافرة بتكلفة معقولة.

لا يمكن لبعض هذه العوامل أن يتحقَّق بوجود بعض العوامل الأخرى تقريباً (على سبيل المثال، من الضروري أن يكون ثمة بعض السيولة في أثناء الكربنة لتحقيق اصطفاف بلَّوري جيد، لكن هذا يتعارض مع متطلب أن يكون الليف غير قابل للانصهار). ولا توجد مادة خام واحدة تحقق جميع هذه المتطلبات، لذا لا بد من إجراء تعديلات أو معالجات بغية الحصول عليها.

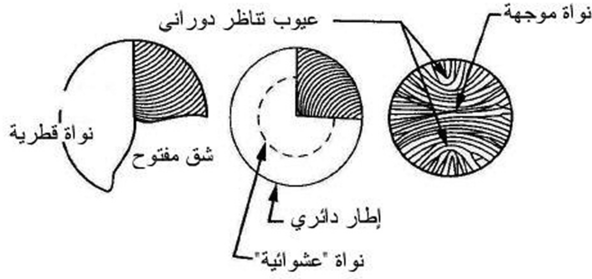
تمثّل ألياف الكربون فقار أي مادة مركَّبة من الـ ك/ك. وتعزى آخر التطورات في مواد الـ ك/ك في المقام الأول إلى التحسينات الناجمة في خواص ألياف الكربون، ومنها الجساءة وعامل المرونة ومقاومة التعب، إضافة إلى عامل التمدّد الحراري المنخفض. تساوي أقطار ألياف الكربون الشديدة المقاومة للشدّ، وذات معامل يونغ الكبير نحو 7 ـ 8 ميكرون، وهي تتكوَّن من بلّورات صغيرة من الغرافيت، وهي إحدى الصيغ المتغايرة للكربون[18]. في الغرافيت، تكون ذرّات الكربون الوحيد البلّورة مرتّبة في صفيفات سداسية،

وتكون الروابط التشاركية القوية جداً فاعلة في مستوى الطبقة، في حين توجد قوى فان دِر فالس (Van der Waals) ضعيفة في ما بين الطبقات. وتتكوَّن الألياف ذات مقاومة الشدّ الكبيرة ومعامل يونغ الكبير عندما تكون تلك المستويات الأخيرة مصطفة اصطفافاً موازياً لمحور الليف. أما ترتيب مستويات الطبقات باتجاه معامد لمحاور الألياف فيؤثّر في خواصها العرضانية، وفي خواص القص.

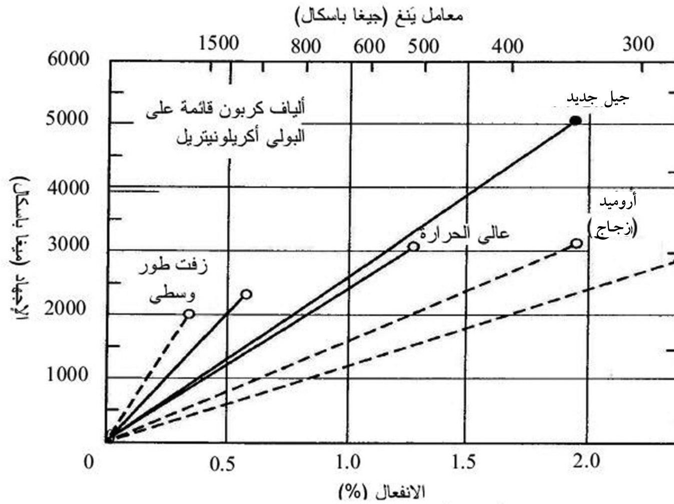
تُنتَج ألياف الكربون والغرافيت إما من مادة أولية عضوية ليفية أو من الزفت. من المواد الأولية العضوية الليفية الرايون (Rayon) والبولي أكريلونيتريل (Polyacrylonitrile) (PAN) والأكريليك (Acrylic). تتصف ألياف الكربون المصنوعة من البولي أكريلونيتريل بقشرة رقيقة من المستويات الطبقية المحيطية ونواة ذات بلّورات عشوائية. أما ألياف الطور الوسطي (Mesophase) المشتقة من الزفت فلها بُنَى طبقية موجّهة قطرياً. يبيّن الشكل 3 ـ 2 ثلاث بُنى ليفية أساسية[1]. إن هذه البُنى المختلفة تؤثر كثيراً في خواص الألياف. ويتضمن الشكل 3 ـ 3 ملخّصاً لخواص أنواع مختلفة من ألياف الكربون[20].

انبثق نوعان رئيسان من ألياف الكربون عن البولي أكريلونيتريل في مراحل التطوير الأولى. وحصل ذلك بعد ملاحظة أن معامل يونغ قد ازداد باطِّراد مع ازدياد درجة حرارة المعالجة الحرارية حتى قيمتها القصوى (Highest Heat Treatment Temperature) (HTT) التي تساوي 2700 مْ (بالنسبة إلى ألياف النوع I ذات معامل يونغ الكبير (HM) High Modulus))، في حين أن مقاومة الشدّ وصلت إلى قيمتها العظمى عند درجات حرارة بين 1400 و1500 مْ (ألياف من النوع II، أو عالية درجة الحرارة HT)، وفق ما هو مبيّن في الشكل 3 ـ 4. تنجم زيادة معامل يونغ عن تحسُّن اكتمال واصطفاف البلّورات، مع أن الليف ذا معامل يونغ الكبير ليس غرافيتياً جداً عند

كثافة تساوي 1.9 غ/سم$^3$. أما سبب وصول مقاومة الشدّ إلى قيمة أعظمية عند درجات الحرارة المنخفضة فيُعزى إلى حقيقة أن المقاومة محدودة بالعيوب. فإلى جانب العيوب التي تنشأ بسبب إضافات وفراغات عرَضية، فإن التقلُّص الناجم عن البرودة من حرارة المعالجة يؤدّي إلى تكوُّن تصدعات طولانية جميعها يحد من المقاومة.

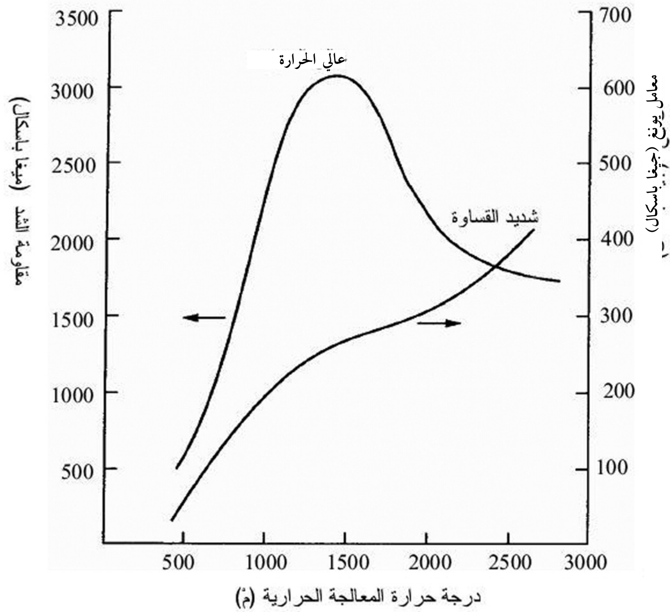



**الشكل 3 ـ 2: ثلاثة أنواع من الألياف ذات معامل يونغ الكبير القيمة المغزولة من زفت طور وسطي.**




**الشكل 3 ـ 3: الخواص الميكانيكية لأنواع ألياف الكربون المختلفة.**

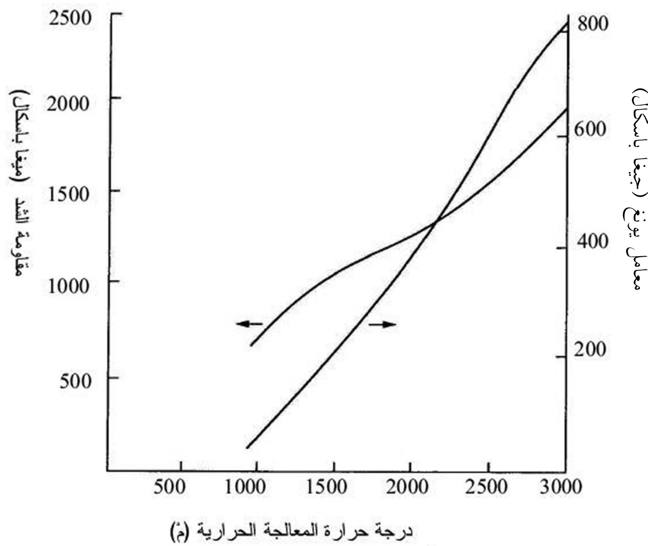
ثمة استخدامات لكل من الألياف ذات معامل يونغ الكبير والألياف الحرارية في مواد الـ ك/ك[21]، لكن في حالة تقوية راتنجات التصليد الحراري، فإن استطالاتها الصغيرة التي تقل عن 1 في المئة عند نقطة انهيار الشدّ جعلتها أقل قبولاً. ثمة نوع ثالث من ألياف الكربون القائمة على البولي أكريلونيتريل (ليف نوع III أو A) درجة حرارة معالجته الحرارية أقل من درجة الحرارة التي تتحقّق عندها مقاومة الشدّ القصوى في الليف العالي درجة الحرارة، لكن بمقاومة شدّ أكبر، طُوِّر لاحقاً لتحقيق هذا المتطلب. ولم يجد هذا النوع من مواد الـ ك/ك تطبيقات كثيرة. وخلال الخمسة عشر عاماً الماضية، جرى تطوير عدد من ألياف الكربون القائمة على البولي أكريلونيتريل في محاولة لاستمثال مقاومة الشدّ ومعامل يونغ وعامل الاستطالة والتكلفة. وسمِّيت بالألياف ذات معامل يونغ المتوسط، وكانت قد نجمت عن بحث في العلاقات بين بنية وخواص الليف إلى جانب تحسينات في سيرورة الإنتاج. ومنذ مدة قصيرة، كان ثمة اهتمام في تحضير ألياف أرقّ قائمة على البولي أكريلونيتريل أيضاً بهدف تحسين المواصفات الميكانيكية. وحتى الآن، فإن جميع مواد البولي أكريلونيتريل الأولية كانت تقوم على ليف نسيجي قطره 13 ميكرون يُعطي بعد التقلُّص الناجم عن الكربنة ألياف كربون أقطارها تساوي 8 ـ 7 ميكرون. أما الألياف الجديدة، ذات الأقطار 5 ـ 4 ميكرون، فتسعى إلى استخدام حقيقة أن العيوب المحدّدة لمقاومة الشدّ هي ظاهرة تتعلق بالحجم. لذا يُتوقع أن يحتوي الليف الأضيق على عيوب أقل، وأن يتسم بخواص أفضل من حيث مقاومة الشدّ والتشوّه. بذلك يكون ثمة تنوّع في ألياف الكربون القائمة على البولي أكريلونيتريل التي يمكن الاختيار منها لتحضير الـ ك/ك.




**الشكل 3 ـ 4: مقاومة الشد والقساوة في ألياف الكربون القائمة على البولي أكريلونيتريل.**

باستثناء الرايون والبولي أكريلونيتريل، لم تلقَ الألياف النسيجية الأخرى قبولاً بوصفها مصدراً للألياف الكربونية العالية الجودة. إلا أن ثمة مادة أولية ثالثة لألياف الكربون حظيت بالاهتمام لأنها توفّر ألياف كربون عالية الجودة بتكلفة أقل من تكلفة الألياف القائمة على الرايون أو على البولي أكريلونيتريل. إنها الزفت الذي يترسَّب من كربنة الفحم ومن تكرير النفط، والمتوفّر بكثرة بتكلفة منخفضة. إن الزفت معروف جيداً في صناعة الكربون بوصفه المادة الرابطة الرئيسة في تصنيع الغرافيت الصناعي الذي أُنتجت منه أنواع كثيرة مختلفة الجودة. ويمكن غزله على شكل ألياف من الصُهارة، لكنه مثل البولي أكريلونيتريل، قابل للانصهار ويحتاج إلى معالجة بالأكسدة ليصبح ملائماً للكربنة على شكل ليف. كيميائياً، يُعدُّ الزفت مزيجاً معقداً من

المركَّبات الأليفاتية المنخفضة الوزن الجُزَيئي، والجُزَيئات العطرية الحلقية المكثفة، والبُنى ذات الحلقات المُغايرة، ومواد غير عضوية. إن المنظومات العطرية المستوية المكثفة، التي تحتوي على أربع أو خمس حلقات، تمتلك تشكيلة غرافيتية طبقية كامنة إذا اقترنت بسيولة الزفت أعطت بنية غرافيتية بصيغتيها المكربنة والمغرفتة. وبسبب هذه البنية المتأصّلة والمفضّلة، ليس من الضروري مطّ ألياف الزفت في أثناء الكربنة بغية الحصول على اصطفاف جُزَيئي، وهذه مزية جيدة مقارنة بالبولي أكريلونيتريل، توفّر إمكانية إضافية لتخفيض التكلفة.




**الشكل 3 ـ 5: مقاومة الشد ومعامل يونغ في ألياف الكربون القائمة على الزفت**[22].

وخلافاً للألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل، فإن مقاومة الشدّ في الألياف القائمة على الزفت لا تمر عبر قيمة عظمى في أثناء

المعالجة الحرارية، بل إن المقاومة ومعامل يونغ يتزايدان باستمرار مع تزايد درجة حرارة المعالجة الحرارية، وفق المبيّن في الشكل 3 ـ 5. تتوفّر حالياً ألياف قائمة على الزفت بمقاومة شدّ تساوي 2000 ميغا باسكال (مشابهة لتلك التي لألياف الحرارة العالية القائمة على البولي أكريلونيتريل)، ومعامل يونغ يتجاوز 800 جيغا باسكال (مثل تلك التي لألياف الحرارة العالية)، وكثافة تساوي 2.15 غ/سم$^3$، وهي كثافة تقارب القيمة النظرية البالغة 2.26 غ/سم$^3$ للغرافيت التام التبلور. إن هذه الألياف الشديدة التبلور، تعاني الاستطالة المنخفضة، لكنها تُبدي تفوّقاً في الناقلية الكهربائية والحرارية ومقاومة التأكسد مقارنة بالألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل، وبذلك تكون ذات فائدة كبيرة في بعض التطبيقات.

## مواد الحاضنة

إن انتقاء مواد الحاضنة على درجة عالية من الأهمية بالنسبة إلى الخواص التصميمية المفصَّلة لمواد الـ ك/ك، فالبنية الميكرويّة للحاضنة يمكن أن تؤثّر في أداء الألياف، ومن ثم في خواص المادة المركَّبة.

بالمعنى الواسع، يمكن لأيّ مادة عضوية أن تتفكَّك حرارياً في جو خامل لإنتاج راسب كربوني متماسك، أو خامة فحمية، أن تكون مادة حاضنة (انظر الجدول 3 ـ 1). إلا أن إنتاجية الفحم وخواصه التي يُحصل عليها من بوليمرات عضوية مختلفة تتباين كثيراً تبعاً لطبيعة المادة الأولية. عملياً، ثمة ثلاث فئات من المواد الحاضنة الأولية المستخدمة في مواد الـ ك/ك: الراتنجات المصلَّدة حرارياً، وزفتات قطران النفط والفحم، والغازات الهيدروكربونية الغنية بالكربون لاستخدامها في تسريب البخار كيميائياً (Chemical Vapor Infiltration) (CVI).

ثمة وظيفتان بينهما صلة، لكنهما مختلفتان إلى حد ما، للمادة الحاضنة في مواد الـ ك/ك. الأولى هي تقسية، أو تصليد المقويات الليفية قبل عملية التكثيف، والأخرى هي تكثيف البنية التي جرى تصليدها. ومع أنه يمكن استخدام أنواع المواد الحاضنة الأساسية الثلاثة لكلا الغرضين، فإن التصليد الأولي يتحقّق عادة بالراتنجات الحرارية التصليد. في ما يأتي سنعرض نوعين منها[23].

**الجدول 3 ـ 1:** لائحة مكوّنات لمواد ك/ك مركَّبة.

| ألياف الكربون | أنواع الحاضنات | المواد المسرَّبة المكثفة |
| --- | --- | --- |
| **ألياف البولي أكريلونيتريل:** | **راتنجات حرارية التصليد:** | **راتنجات حرارية التصليد وحرارية التلدُّن** |
| نوع عالي المرونة | راتنج الفينول | راتنج الفينول |
| نوع عالي مقاومة الشدّ | راتنج الفوران | راتنج الفوران |
| **ألياف زفت:** | راتنج الإيبوكسي | الزفت |
| نوع عالي المرونة | راتنج البولي إيميد | **مكوّنات تسريب البخار كيميائياً:** |
| (نفطي، كربوني) | راتنج عطري مكثَّف متعدّد النوى | الميثان |
| ألياف رايون | راتنجات حرارية التلدُّن: | البروبان |
| | زفت: | البنزن |
| | متناحي | ثنائي كلور إيثيلين |
| | لامتناحي | |
| | زفت + راتنج الفينول | |
| | بوليمرات عطرية | |
| | **مواد تقوية:** | |
| | فحم كوك | |
| | سناج الكربون | |
| | غرافيت طبيعي | |
| | كربون طور وسطي | |

تُعدُّ الراتنجات الحرارية التصليد ملائمة لحاضنة الـ ك/ك بسبب سهولة تشريبها. فمعظم الراتنجات الحرارية التصليد تتبلمر عند درجة حرارة منخفضة (250> مْ) لتكوِّن نوعاً غير متبلور مصلّداً حرارياً شديد التشابك. ويسبب التسخين الإضافي حتى الدرجة 3000 مْ غرفتة

هذه البوليمرات. تتضمن منظومات الراتنج التي تتصف بهذه الخواص الفينوليكات (Phenolics) والفيوريلات (Furyls) والفوران (Furan) وبعض مواد الإيبوكسي المختارة[24][26].

تُستخدم راتنجات الفينوليك كثيراً في إنتاج الـ ك/ك بسبب مقاومتها للحرارة العالية، واستقرار وسماحيات أبعادها، ومقاومتها للتشوّه الزاحف. وتُعتبر هذه الراتنجات بوليمرات بلمرة بالتكاثف، وهي تُشتقّ من تفاعل الفينولات مع الألدهيدات (Aldehydes). وتُختار الفينوليكات لمعالجة مواد الـ ك/ك بسبب مقاومتها العالية للتفحم، وهذا يسمح باستخدامها في تطبيقات معيّنة تتفكك فيها معظم الراتنجات العضوية[24][27]. وإنتاجية الفحم من إسترات الفيوريل (Furyl esters) عالية أيضاً، وهي تُستخدم غالباً لإعادة تشريب المواد بعد أن يكون راتنج الفينوليك قد تعرض للتفكُّك الحراري. والفوران هو راتنج حراري التصليد أيضاً تتكوَّن فيه بنية بلورية متجانسة كثيفة حين تعريضه للتفكُّك الحراري[27].

### راتنجات زفت القطران

تُستخدم زفتات قطران النفط والفحم بوصفها مواد أولية حاضنة في مواد الـ ك/ك. تتصف زفتات قطران الفحم، التي هي منتجات ثانوية تتكوَّن في فرن فحم الكوك، بدرجة حرارة تليُّن منخفضة، ولزوجة منخفضة (في طور الصُهارة)، وإنتاجية غرافيت عالية. ويمكن زيادة إنتاجية الزفت للغرافيت كثيراً بالتفكيك الحراري تحت ضغط غاز عالٍ[28].

يمر الزفت عبر مراحل عدّة في أثناء الكربنة. وهذه المراحل هي التطاير والبلمرة والتقطيع وإعادة ترتيب البنية الجُزَيئية. في أثناء الكربنة، تتكوَّن كرات ضمن الراتنج تتصف ببنية شديدة التوجّه على نحو مشابه للبلّورات السائلة. وقد سُمِّي تكوُّن الكرات بالطور الوسطي، وهو طور

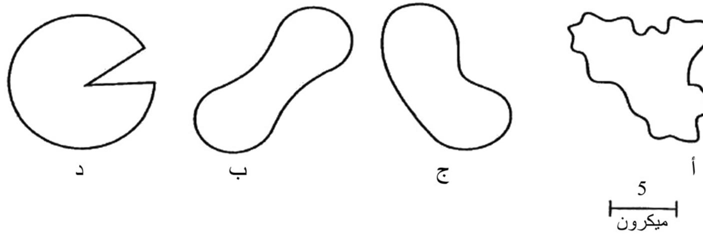
مهم في معالجة مواد الـ ك/ك. وتُستخدم سيرورتا التدوير الضغطي (Pressure Cycling) والأكسدة للتحكّم في سلوك الطور الوسطي في أثناء المعالجة. ويُصلّد التسخين الإضافي تلك الكرات، وعند درجات حرارة تقارب 2500 مْ، تتكوَّن البنية الغرافيتية[25].

## بنية ألياف الكربون

يُبدي المظهر الخارجي لألياف الكربون، المكوَّنة من المواد الأولية الرئيسة الثلاث، أشكالاً مميَّزة جرى تحديدها بواسطة المجهر البصري، وهذه الأشكال مفيدة في تحديد أصل الليف. تمتلك ألياف الكربون القائمة على الرايون مقطعاً عرضانياً متجعِّداً غير منتظم مبيَّناً في الشكل 3 ـ 6 ـ أ. أما الألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل، فتأتي بشكلين مميزين للمقطع العرضاني، وفقاً للطريقة المستخدمة للتحضير الأولي للبولي أكريلونيتريل. وتلك التي تُغزل رطبة من محلول في حمام تخثير تمتلك مقطعاً عرضانياً دائرياً يبقى موجوداً في صيغة الكربون، إلى درجة أن الأثلام الضئيلة الناتجة من نفثات الغزل يمكن أن تُرى عادة. أما ألياف البولي أكريلونيتريل المغزولة من محلول في هواء دافئ (ألياف تُغزل جافة) فلها مقطع عرضاني مميز على شكل كتلة تمرين العضلات أو عظمة الساق. تحتفظ هذه الألياف بهذا الشكل (الشكل 3 ـ 6 ـ ب) الذي يتشوّه أحياناً ليأخذ شكل الكلية (الشكل 3 ـ 6 ـ ج). وأما ألياف الكربون القائمة على الزفت، فهي مبدئياً ذات مقطع عرضاني دائري، إلا أن تلك الألياف تميزت في أيامها الأولى بعيوب طولانية أدت إلى مقطع عرضاني دائري مثلوم وفق المبين في الشكل 3 ـ 6 ـ د.

ليس الزفت بوليمراً ذا وزن جُزَيئي كبير، لذا لم تُقترح البنية

الشريطية الطويلة لألياف الكربون المصنوعة من الزفت. وأدّت التطويرات اللاحقة، وعلى وجه الخصوص غزل الطور الوسطي، إلى ألياف كربون ذات بنية مختلطة من بلّورات موجَّهة قطرياً ومحيطياً وعشوائياً محتفظة بالمقطع العرضاني الدائري الأصلي. وتؤدّي العطرية العالية إلى ألياف كربون ذات بنية أشدّ غرافيتية، وبُلَيْرات أكبر أبعاداً، من تلك التي للألياف المصنوعة من الرايون أو البولي أكريلونيتريل.




**الشكل 3 ـ 6: أشكال مقاطع عرضانية لبعض ألياف الكربون : (أ) القائمة على الرايون، (ب) والقائمة على البولي أكرونيتريل الذي له شكل عظمة الساق، (ج) والقائمة على البولي أكريلونيتريل الذي له شكل عظمة ساق مشوّه، (د) والقديمة القائمة على الزفت.**

يتضح مما سبق أن ثمة عدداً هائلاً من ألياف الكربون المختلفة بخواص تعتمد على أصلها وظروف تصنيعها. وإضافة إلى الأصناف الرئيسة القائمة على المواد الأولية والمعالجة الحرارية، طوَّر المصنِّعون طيفاً واسعاً من الألياف المتخصّصة للتطبيقات المختلفة، إلى حد أن ثمة مطبوعات مكرَّسة حصرياً لوصف الأنواع المتوافرة[29]. يتضمن الجدول 3 ـ 2 قائمة بأكثر الألياف استخداماً في الـ ك/ك مع بعض خواصّها المهمة.

## ألياف الكربون القائمة على الرايون

يُصنع معظم أنواع الألياف من مواد البولي أكريلونيتريل الأولية، إلا أن ثمة عددًا متزايداً يُصنع من الزفت. فالزفتات هي منتَجات

ثانوية منخفضة التكلفة، وهناك إمكانات تقانية كثيرة لتحسين الألياف المشتقة منها. ولذا فإن حصتها من الصناعة سوف تزداد. لقد كانت ألياف الكربون القائمة على الرايون أول ألياف تُنتَج للتطبيقات الإنشائية، وما زالت بضعة منها متوافرة. وهذه الألياف هي من النوع ذي مقاومة الشدّ ومعامل يونغ المنخفضين، لكنها تبقى موضع اهتمام بفضل ناقليتها الحرارية المنخفضة نسبياً ومرونتها الجيدة. وقد شكّلت جزءاً مهماً من برامج الدفاع والفضاء الأميركية في ستينيات وسبعينيات القرن العشرين بوصفها أول مواد ك/ك جرى تطويرها واستخدامها في ألياف الكربون القائمة على الرايون. وكثير منها ما زال في الخدمة حتى الآن. يتضمن الجدول 3 ـ 3 ملخصاً للخواص الأساسية للألياف المتوفّرة للاستخدام في مواد الـ ك/ك.

يبيّن الشكل 3 ـ 7 العناصر الأساسية اللازمة لإنتاج فتائل كربونية من الرايون[30]. تحصل أول معالجة حرارية ذات درجة حرارة منخفضة عند نحو 300 درجة تقريباً عادة، وتتغيّر البنية في أثنائها إلى صيغة تبقى مستقرة عند درجات حرارة معالجة أعلى. وتتضمن السيرورة بلمرة وتكوين شبكات، ويمكن تعريض الرايون إلى معالجة كيميائية قبل تعريضه للأكسدة. ويمكن للحمام الكيميائي أن يكون محلولاً مائياً من كلوريد الأمونيوم (Ammonium chloride) أو محلولاً ممدداً من حمض الفوسفور في إيثانول معدّل الخواص الطبيعية. تعمل المعالجة الكيميائية على تقصير مدة خطوة المعالجة بدرجة حرارة منخفضة من ساعات عدة إلى نحو 5 دقائق. ويضيع نحو 50 ـ 60 في المئة من كتلة الليف في منتجات مفكّكة على شكل $H_2O$، $CO$، $CO_2$ في أثناء الأكسدة. وتُجرى خطوة الكربنة، التي تؤدّي إلى مزيد من تلاشي الكتلة، عادةً عند درجة حرارة تساوي 1500 مْ تقريباً. وتساوي الإنتاجية بعد الكربنة عادة نحو 20 ـ 25 في

المئة من وزن البوليمر الأصلي. وعند هذه المرحلة تصبح الألياف ذات بنية متناحية من حيث الجوهر. أما الخواص الميكانيكية للرايون المكربن فهي سيئة، وذلك بسبب الاصطفاف السيِّئ لطبقات الغرافين. ويؤدّي مطّ الألياف في أثناء المعالجة الحرارية عند درجات حرارة الغرفتة إلى ازدياد مقاومة الشدّ ومعامل يونغ زيادة ملحوظة، لكن هذه العملية مرتفعة التكاليف. إن الخواص الميكانيكية السيئة، إضافة إلى إنتاجية الكربون المنخفضة، وارتفاع تكلفة الغرفتة، تعني أن ألياف الكربون القائمة على الرايون السابقة لم تكن منافسة في الأسواق، مع أنها استُخدمت كثيراً في تقانات المواد المقاومة النيران بسبب ناقليتها الحرارية الضعيفة عبر سماكتها، ولأن موادها المركَّبة تظهر مقاومة قص شديدة في ما بين الصفائح. يتضمن الجدول 3 ـ 4 لائحة بخواص ألياف الكربون القائمة على الرايون. وثمة مراجعة كاملة لتحويل الرايون إلى ألياف كربونية في كتاب جيل [31] (Gill).

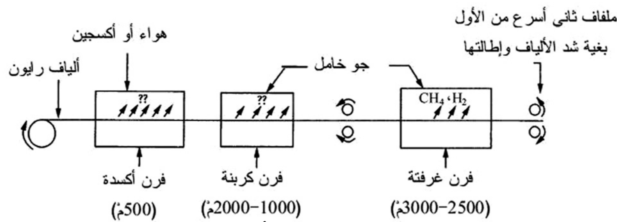
**الجدول 3 ـ 2**: خواص بعض ألياف الكربون المستخدمة في مواد الـ ك/ك .

| المصنّع | Hercules (الولايات المتحدة) PAN | | | Toray (اليابان) PAN | | | | BASF (ألمانيا) PAN | | Amoco (الولايات المتحدة) زفت | | | المادة الأولية |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **الدرجة** | AS4 | IM6 | HMS4 | T300 | T800 | M40 | M50 | G40 | GY70 | P55 | P75 | P100 | غ و ب |
| القطر، ميكرون | 8 | 5 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 10 | 10 | 10 | |
| الكثافة، غ/سم $^3$ | 79.1 | 76.1 | 80.1 | 76.1 | 1.81 | 1.81 | 1.91 | 1.77 | 1.96 | 2.0 | 2.0 | 2.15 | 2.26 |
| مقاومة الشد، جيغا باسكال[a] | 7.3 | 1.5 | 3.2 | 3.5 | 5.6 | 2.7 | 2.4 | 5.0 | 1.9 | 1.9 | 2.1 | 2.2 | 100[b] |
| معامل يونغ (القساوة)، جيغا باسكال[a] | 230 | 280 | 360 | 230 | 300 | 400 | 500 | 300 | 520 | 380 | 520 | 700 | 1000[b] |
| الاستطالة، ٪[a] | 6.1 | 7.1 | 8.0 | 1.5 | 1.9 | 0.6 | 0.5 | 1.6 | 0.3 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 10[b] |
| المقاومة الكهربائية، مكرو أوم للمتر[a] | - | - | - | -18 | -14 | -11 | -9.5 | 13 | 6.5 | 8.5 | 7 | 2.5 | 0.4[b] |
| معامل التمدّد الحراري الخطي، × $10^{-6}$ / كلفن[a] | - | - | - | 0.6 | 0.75 | 0.75 | 0.7 | - | - | -1.3 | -1.4 | -1.45 | -1.8[b] |
| الناقلية الحرارية[a]، واط/(متر كلفن) | - | - | - | 10 | 15 | 45 | 100 | - | 175 | 100 | 150 | 300 | 2000 |

[a] الخواص في الاتجاه المحوري.
[b] الخواص في المستوي ab.
PAN: بولي أكريلونيتريل، غ و ب: غرافيت وحيد البلّورة.

## **الجدول 3 ـ 3**: لائحة ببيانات خواص ألياف الكربون

| المادة الأولية | مقاومة الشدّ المحورية (جيغا باسكال) | عامل الشدّ المحوري (جيغا باسكال) | مقاومة الضغط المحورية (جيغا باسكال) | الكثافة (غرام للسنتيمتر المكعب) | الناقلية الحرارية المحورية (واط/ كلفن متر) | المقاومة الكهربائية النوعية المحورية (مكروأوم متر) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - رايون | 0.25 -0.7 | 25-40 | | 1.5 | 3.5-4.0 | 35-60 |
| - زفت متناحي | 0.8 - 1.0 | 40 | | 1.6 | 15-40 | |
| - زفت طور وسطي | 1.4 - 3.9 | 160-965 | 0.45-1.15 | 1.9-2.2 | 120-1100 | 2-13 |
| - PAN عالي الحرارة | 3.0-5.0 | 210-250 | 2.7-2.9 | 1.7 | 10-25 | 18 |
| - 7 ميكرون معامل يونغ عالي | 2.3-3.5 | 360-490 | 1.6 | 1.9 | 70 | 10<br>7 |
| - معامل يونغ عالي جدا | 1.9 | 570 | 1.0 | 1.96 | 15 | 14 |
| -PAN عالي الحرارة | 5.1-5.8 | 280-310 | 2.75 | 1.8 | | |
| - 5 ميكرون معامل يونغ عالي | 3.9-4.5 | 435-590 | | 1.85 | | |




**الشكل 3 ـ 7: العناصر الرئيسة اللازمة لصنع ألياف كربونية من الرايون.**

## **الجدول 3 ـ 4**: خواص عامة لألياف الكربون القائمة على الرايون

| | | |
|---|---|---|
| محوري | مقاومة شد | 1.0 جيغا باسكال |
| | معامل يونغ | 41.0 جيغا باسكال |
| | الاستطالة حتى القطع | في المئة 2.5 |
| | المقاومة النوعية | 20 أوم متر |
| | الكهربائية | 1.6 غرام للسنتيمتر المكعب |
| كتلي | الكثافة | 8.5 ميكرون |
| | قطر الليف | 99 في المئة |
| | نقاوة الكربون | |

## ألياف الكربون القائمة على البولي أكريلونيتريل

اكتُشف في أواسط ستينيات القرن العشرين أنه يمكن جعل بنية البولي أكريلونيتريل مستقرة بعملية أكسدة ساعدت على التفكيك الحراري المتحكَّم فيه في أثناء مرحلة الكربنة الثانية، وهذا ما مكَّن من إنتاج ألياف كربون بخواص ميكانيكية متفوقة على تلك التي للرايون. وشهدت أواخر الستينيات وأوائل السبعينيات من القرن العشرين تحوّلاً سريعاً من طرائق المعالجة على دفعات منفصلة إلى المعالجة المستمرة. وتغيّر عدد الألياف في حزمة الألياف غير المجدولة من مصنِّع إلى آخر، خصوصاً عندما يكون البولي أكريلونيتريل هو المادة الأولية. ثم جرت مَقيَسة هذا العدد على نحو متزايد ليُصبح 1، 3، 6، 12، 15 ألف ليف للصناعات الجوية والفضائية المتقدمة، وللسلع الرياضية. أما أكثرها شعبية فهي ذات الـ 6 و12 ألف ليف. وفي ما يخصّ الحزم التي هي أكبر (24 ألف حتى 320 ألف) فتُنتَج في المقام الأول لتطبيقات السيارات ومركَّبات قولبة الألياف المفرومة.

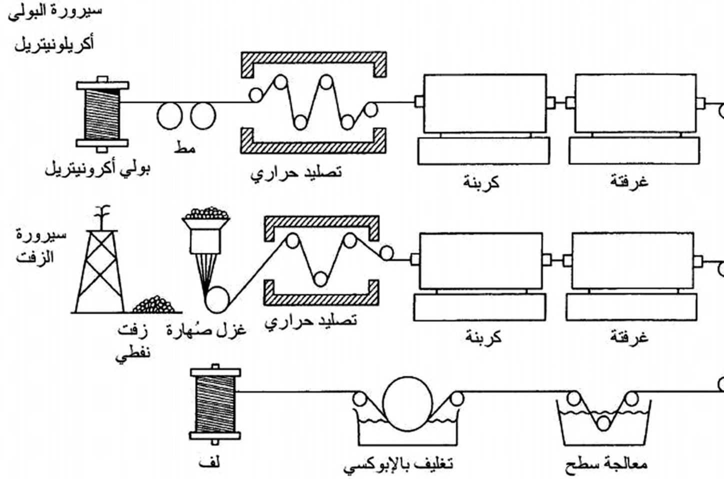
يمكن تقسيم الألياف المشتقة من البولي أكريلونيتريل عموماً إلى ثلاث فئات:

1 ـ ألياف تجارية ذات معامل يونغ منخفض (120 ـ 190 جيغا باسكال).

2 ـ ألياف ذات معامل يونغ متوسط (220 ـ 250 جيغا باسكال). وهذه الألياف عالية الجودة، وتتصف بأعلى مقاومة للشدّ وأكبر تشوّه قبل الانقطاع (1.2 ـ 1.4 في المئة تزداد حتى 1.5 ـ 1.8 في المئة في الأنواع المتخصصة الشديدة الانفعال)، وهي النوع المفضّل في تصنيع الطائرات وسيارات السباق.

3 ـ ألياف ذات معامل يونغ عالٍ (360 ـ 400 جيغا باسكال).

توفّر هذه الألياف جساءة جيدة على حساب مقاومة الشدّ والانفعال قبل الانقطاع (0.5 ـ 0.8 في المئة).




**الشكل 3 ـ 8: تُري مراحل معالجة البولي أكريلونيتريل والزفت الوسطي الطور لصنع الألياف الكربونية تشابه السيرورتين. تعطي سيرورة البولي أكريلونيتريل أليافاً شديدة التوجيهية من خلال المط الحار لألياف البوليمر قبل الكربنة، في حين أن الدرجة العالية من التوجيهية في حالة الزفت هي نتيجة طبيعية للطور الوسطي (بلورات سائلة)**[33][34].

يكمن سبب تنوع خواص الألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل في موسِطات المعالجة المستخدمة في تحويل البوليمر إلى كربون، ويؤدّي هذا التنوع إلى المقدرة على تفصيل تلك الخواص وفقاً للمتطلبات. تُنتقى مواد البولي أكريلونيتريل الأولية التي سوف تُستخدم في ألياف الكربون على أساس تحقيق درجة عالية نسبياً من توجيهية الـ ك/ك ضمن سلاسل البوليمر. يتضمن تحويل البولي أكريلونيتريل إلى كربون مرحلة أكسدة أولية، وكربنة، وغرفتة عالية الحرارة. في أثناء كل من هذه العمليات، يُحافظ على توجيه الـ ك/ك على طول محور الليف في الوقت نفسه الذي تجري فيه

التفاعلات الكيميائية الهدّامة المتنافسة التي تتضمن تلاشي جميع الذرّات غير الكربونية. وتتحسن التوجيهية كثيراً في أثناء المعالجة عند درجات حرارة أعلى نتيجة لنمو البُلَيْرات واصطفافها محورياً، ويمكن تحقيق مزيد من التحسين بتطبيق الشدّ أو المط. إن معامل يونغ للألياف على صلة مباشرة بالتوجيه المفضل لطبقات الغرافين، لذا فإن التحكم في التوجيه سوف يسمح بتفصيل معامل يونغ لليف وفق الرغبة.

يمكن للبولي أكريلونيتريل أن يُغزل على شكل ألياف بوليمرية جيدة التوجيه، إلا أن كيمياء سيرورة تحويل البولي أكريلونيتريل إلى ألياف كربون معقّدة جداً. يبيّن الشكل 3 ـ 8 الخطوات الرئيسة في عملية الإنتاج المستمرة[(33)(34)].

## ألياف الكربون المشتقة من الزفت

الزفتات هي خلائط متناحية من الجُزَيئات المتعدّدة الحلقات العطرية التي تَنتُج من معالجة النفط وقطران الفحم. وهي سهلة الصهر نسبياً أو الغزل على شكل ألياف، لكن الألياف الناتجة منها منخفضة معامل يونغ ومقاومة الشد، وهذا ينجم مباشرة عن بنيتها المتناحية. ولا تتحسن خواصها الميكانيكية حتى لو جرت كربنتها عند درجات حرارة عالية إلا إذا كان ثمة مطّ حار عند درجات حرارة عالية جداً تقع في المجال من 2700 حتى 3000 مْ، وهذا مكلف جداً وغير عملي. لكن برغم أن الزفتات متناحية البنية، فقد جرى تطوير عدد من السيرورات لتحويل الزفت إلى طور وسطي أو منظومة بلّور سائل[(25)(35)(36)].

الزفتات التجارية هي خلائط معقّدة من المواد العطرية التي

عندما تُسخَّن حتى 400 مْ تقريباً تخضع إلى تفاعلات تكاثف منزوعة الهيدروجين لتشكل جُزَيئات عطرية مستوية تتكاثر مشكّلةً طور بلّور سائل يُعرف بالطور الوسطي. وعندما تصل نسبة الوسطي إلى 40 في المئة، يحصل انعكاس طوري بحيث تصبح هذه المادة الشديدة اللاتناحي الطور المستمر. وأدى اكتشاف إمكان استخدام زفت الطور الوسطي مادة أولية لألياف الكربون إلى الاعتقاد بأنه يمكن أن يعطي ليفاً جيد الأداء.

إن إنتاجية الكربون من الطور الوسطي أعلى كثيراً من تلك التي يعطيها الرايون أو البولي أكريلونيتريل، ولذا يجب أن تكون سيرورة الزفت أعلى كفاءة[37]. لكن برغم مزية التكلفة المنخفضة الواضحة، فإن ألياف الكربون المشتقة من الزفت العالية الجودة غير قادرة على منافسة الألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل إلا في الحالات المتخصّصة التي تحتاج إلى معامل يونغ كبير جداً ($E > 400$ جيغا باسكال). ويرى هيوز[38] (Hughes) أن ارتفاع التكلفة غير المتوقع الذي يحصل حينئذٍ ينجم عن التنقية الشديدة اللازمة لإبعاد الجُسيْمات المسبّبة للعيوب من المادة الأولية. ويبدو أن أهم تكلفة في إنتاج الألياف القائمة على الزفت تأتي من صعوبة المعالجة، لأن غزل صُهارة زفت الطور الوسطي قد استُبعد من كثير من سيرورات غزل الصُهارة المعروفة[39].

في الحقيقة، تنطوي العبارة **غزل الصُهارة** على شيء من الخطأ في التسمية ناجم عن المصطلحات في صناعة النسيج، حيث تطوَّر إنتاج ألياف الكربون. وقد يكون أكثر دقة أن نسمّي السيرورة ببثق الصُهارة (Melt Extrusion). تتطلب سيرورة غزل الصُهارة النموذجية، ومتغيّرات السيرورة التي تحتاج إلى التحكّم فيها، تحضير المادة الأولية التي تُصهَر عادة في باثق يضخّ الصُهارة إلى **وعاء غزل**.

ويحتوي وعاء الغزل على مرشح لإزالة الجُسيْمات الصلبة من الصُهارة. وبعد الترشيح، تخرج الصُهارة من قعر وعاء الغزل عبر مغزل، وهو صحن يحتوي على عدد كبير من الأنابيب الشعرية. وتبرّد الصُهارة المغادرة للأنابيب، مكوِّنة فتيلة. بعدئذٍ يُلف الليف المصلَّد على بكرة دوّارة بعد تبريده بالهواء.

كي تكون مادة الزفت الأولية قابلة للغزل بسيرورة غزل الصُهارة، عليها أن تكون قادرة على تشكيل فتيلة متماسكة بين مخارج أنابيب المغزل وبكرة اللف، فإذا كانت حرارة الصُهارة أعلى من اللازم، فإن نفثات المادة المبثوقة تتحول إلى قُطَيرات، وهذا ما يُتلف الفتيلة. من ناحية أخرى، إذا تجاوزت مقاومة الفتيلة للشدّ مقاومة شدّ المادة في أي نقطة على طول الخيط، انقطع الليف نتيجة تمزّق روابط المادة. ثمة لكل مادة نافذة من شروط الغزل تسمح بتشكيل فتيلة متماسكة. من ناحية أخرى، ونظراً إلى أن اعتماد لُزوجة زفت الطور الوسطي الشديد على الحرارة يجعل التحكم في سيرورة غزل الصُهارة شديد الصعوبة. فإذا أضيف هذا إلى كون نافذة شروط صنع ألياف الكربون القائمة على الزفت ضيقة جداً [39]، تبيَّن أن غزل صُهارة زفت الطور الوسطي يتطلب تحكّماً في السيرورة بالغ الدقة وعالي التكلفة.

بعد البثق، تُعالَج الألياف حرارياً بالأكسدة ضمن هواء جاف، وذلك بتسخينها ببطء حتى درجة حرارة تقع بين 200 و300 مْ، يتبعها تبريد سريع في جو من الأرغون (خامل). ثم تُكربَن الألياف وتُغرفَت عند حرارة بين 2500 و2700 مْ. يتضمن الجدول 3 ـ 5 الخواص النموذجية لألياف قائمة على زفت طور وسطي.

**الجدول 3ـ5 :** خواص ألياف كربون قائمة على زفت طور وسطي

| الخاصية | معامل يونغ صغير | معامل يونغ كبير | معامل يونغ كبير جداً |
|---|---|---|---|
| **محورياً** | | | |
| مقاومة الشدّ (جيغا نيوتن/ متر$^2$) | 1.4 | 1.7 | 2.2 |
| معامل التشوّه المرن (جيغا نيوتن/ متر$^2$) | 160 | 380 | 725 |
| الاستطالة حتى الانقطاع (٪) | 0.9 | 0.4 | 0.3 |
| الناقلية الحرارية (واط / متر كْ) | - | 100 | 520 |
| المقاومة الكهربائية النوعية (أوم متر) | 13 | 7.5 | 2.5 |
| معامل التمدّد الحراري عند 21 مْ ($10^{-6}$ / كْ) | - | -0.9 | -1.6 |
| **عرضانياً** | | | |
| معامل التشوه المرن (جيغا نيوتن/ متر$^2$) | - | 21 | - |
| معامل التمدّد الحراري عند 50 مْ ($10^{-6}$ / كْ) | | 7.8 | |
| **كتلياً** | | | |
| الكثافة (غ/ سم$^3$) | 1.9 | 2.0 | 2.15 |
| قطر الليف (ميكرون) | 11 | 10 | 10 |
| نقاوة الكربون (٪) | $>97$ | $>99$ | $>99$ |

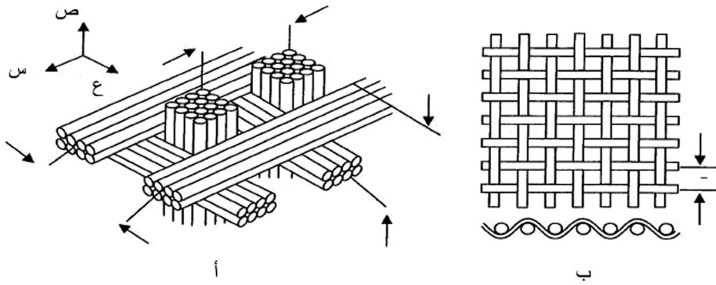
## بنية الليف وبنيانه

يتحدَّد معامل يونغ في ليف الكربون بدرجة التوجيه المفضّلة لطبقات الغرافين على طول محور الليف. ويحكُم مقاومة الشدّ في الليف كل من النسيجين الطولاني والقطري، والعيوب الموجودة في البنية. ويتأثر تبليل الليف بحاضنة من مادة مركَّبة، وقوة الربط عند الملتقيات بين الألياف والحاضنة، كثيراً بتوجيه طبقات الغرافين عند سطح الليف.

إضافة إلى كثرة أنواع الألياف التي يستطيع مصمم المواد المركَّبة أن يختار منها، ثمة أيضاً عدد كبير من البنيانات الليفية المتاحة. وفي تطبيقات الـ ك/ك العالية الجودة، تُكامل مقويات ليفية مستمرة (طولانياً) لإنتاج خامة تشكيل قماشية ثنائية أو ثلاثية الأبعاد. وفقاً لرأي كو[40] (Ko)، تُعرَّف خامة التشكيل القماشية بأنها «بنية

ليفية متكاملة تُصنع بتشبيك ألياف أو حبك خيوط، أو تشكيل عُرى متداخلة، أو توضيع متعدّد محاور (غير نسيجي).

ويمكن للخامة أن تكون جافة (غير مشرَّبة)، كما في البُنى المتعامدة الثلاثية الأبعاد، التي توضع فيها خيوط الإحداثيات س، ع، ص مستقيمة لإنتاج بنية تحتوي على فراغ حجمي بنسبة 60 في المئة تقريباً (انظر الشكل 3 ـ 9 ـ أ). ويمكن أيضاً قضبنة الخيوط (تشريبها براتنج رابط وجعلها على شكل قضبان صلبة). ويمكن أيضاً تشريب القماش برابط راتنجي حراري التصليد ثم حبكه للحصول على المكوِّن المطلوب (الشكل 3 ـ 9 ـ ب). توصف هذه البنية بأنها ثنائية الأبعاد لعدم وجود تقوية ناظمية.




**الشكل 3 ـ 9: رسم توضيحي (أ) لكتلة ثلاثية الأبعاد، و(ب) لقماش منسوج بسيط[11].**

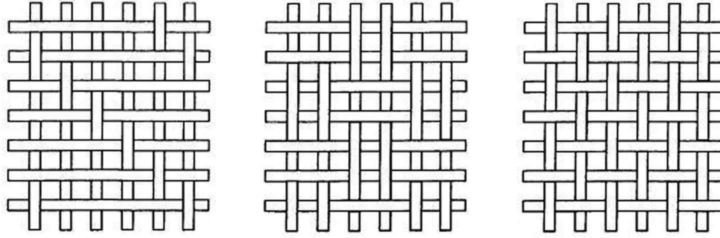
لإنتاج مادة الـ ك/ك، تُشوى المادة المركَّبة كربون ـ راتنج بغية التفكيك الحراري للحاضنة العضوية. وإذا شُرِّبت المادة في البداية بأحدث أنواع راتنج الفينول فورم ألدهيد، أمكننا أن نتوقع الحصول على قطعة ك/ك بمسامية متبقية تساوي نحو 25 في المئة بعد الشَّيْ. إلا أن التجربة بيّنت أن هذه النسبة من المسامية عالية، وأنه يمكن

الحصول على تحسين ملحوظ في خواص المادة الناتجة إذا خُفِّضت لتكون بين 5 و10 في المئة، تبعاً لنوع البنية المختارة. لذا، يجب إدخال زيادة حجمية إضافية من الحاضنة الكربونية في بنية الـ ك/ك، ليس فقط في الخامة الجافة، بل أيضاً في القماش المفكّك حرارياً «السابق التشريب». ويمكن تحقيق تلك الزيادة بواحدة أو أكثر من تقنيات التكثيف: بتسريب الأبخرة كيميائياً، أو باستخدام زفتات النفط أو قطران الفحم، أو راتنجات حرارية التصليد.

### النسْج

من النادر استخدام ألياف الكربون التي تقع أقطارها بين 5 و10 ميكرون فرادى، فالمنتجون يقدّمون الألياف على شكل حزم تُسمّى شللاً، تحتوي كل منها على 1000، أو 3000، أو 6000، أو 000 12 ليف (1k, 3k, 6k, 12k). يمكن نشر الشلل غير المفتولة لتشكيل شريط أحاديّ البعد، وهو شكل مفيد لسيرورات تصنيع مواد معيّنة، إلا أن ما هو أكثر فائدة هو فتلها. أما مقدار الفتل فيمكن أن يختلف من أقل من فتلة واحدة حتى عدة مئات الفتلات في المتر الطولي. ويمكن استخدام الشلل مباشرة في صنع المواد، أو يمكن حياكتها على شكل قماش عادي بأشكال مختلفة كتلك المبيّنة في الشكل 3 ـ 10 الشائعة في صناعة النسيج. يوفّر النسْج طريقة مهمة لتحقيق تقوية بالألياف ثنائية الأبعاد للمواد المركَّبة، ومنها الـ ك/ك، لكن نظراً إلى هشاشة ألياف الكربون مقارنة بالنسُج، فإنه يجب تعديل طريقة النسج. فبدلاً من المكوك المعهود الذي يحمل خيط اللُحمة لتمريره بين الأسدية، يُستخدم نظام من السكاكين لتوفير تمريرات أحادية للُحمة، مع تزليق مائي أحياناً. في هذه الأقمشة، تتدنَّى خواص الألياف الميكانيكية قليلاً بسبب الطيّات المتشكّلة في أثناء تمرير شلل الليف فوق، وتحت، بعضها. ويُعتبر النسج الصقيل أفضل من النسج

المحجَّر أو البسيط لأن طول الليف غير المطوي يكون أكبر، والألياف المستقيمة تسمح بالاقتراب من خواص الليف الميكانيكية الأصلية.




**الشكل 3 ـ 10: أنماط نسيجية: (أ) نسيج بسيط، (ب) نسيج محجَّر ثنائي الخطوة، (ج) نسيج شريطي. ناعم.**

لتسهيل سيرورة النسج وتقليص الاحتكاك وتلف الليف، تُغطّى الشلل بكمية قليلة (0.5 حتى 2 في المئة من الكتلة) من مادة دبقة هي عادة راتنج الإبوكسيد (Epoxide) غير المشوي الذي يُطبق بواسطة محلول مذيب عضوي. إن وجود الإيبوكسي الواقي غير ضار في مواد الحاضنة الراتنجية، إلا أنه يمكن أن يكون متعباً في الـ ك/ك، وهو يُزال عادة من خلال الغسيل بمذيب أو بالحرارة. يجب عدم الخلط بين هذا الغطاء الواقي والمعالجة السطحية التي هي سيرورة أخرى تطبق على ألياف الكربون. إن المعالجة السطحية هي معالجة أُكسيدية لسطح الليف تُجرى بتفاعلات غازية أو كهروليتية أو كيميائية رطبة. والغرض منها هو أن تتوفّر، على سطح الكربون الخامل كيميائياً، مناطق نشطة مستقطبة كهربائياً تحسِّن ارتباط الليف بالحاضنة الراتنجية. إن هذه الخطوة مهمة جداً في المواد المركَّبة راتنج الكربون/ راتنج، لأن جودة تلك المواد تعتمد على النقل الفاعل للإجهاد من الحاضنة إلى الألياف، ويتحقّق هذا بالربط القوي. أما في حالة الـ ك/ك، فإن الخواص الميكانيكية لا تعمل بتلك الآلية

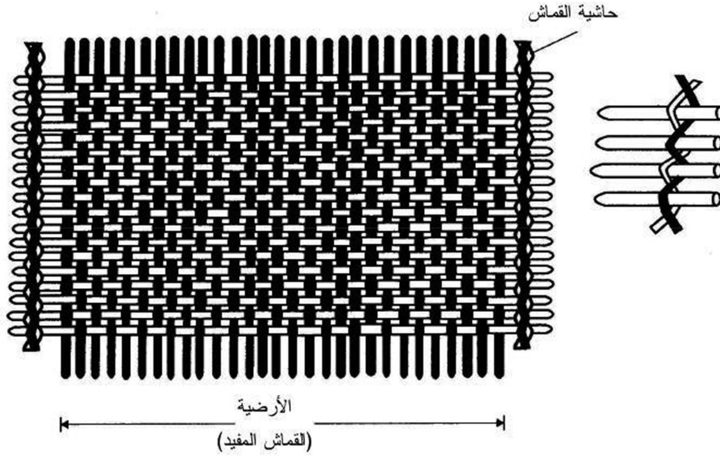
نفسها، لأن الربط القوي لليف بالحاضنة يمكن أن يكون مؤذياً في أنماط إجهاد معيّنة. لذا من الضروري أخذ التطبيق النهائي في الحسبان قبل اتخاذ القرار باستخدام أليافٍ معالجة سطحياً في مواد الـ ك/ك. لقد أُثبت أن معالجة سطح الليف يمكن أن تُعكس، أي تُزال آثارها، بالتسخين في جو خامل حتى درجات حرارة بين 1300 و1600 مْ[11][22].

إضافة إلى النسْج الأساسي الثنائي الأبعاد، يمكن تحويل ألياف الكربون إلى قماش غير منسوج تُصفُّ فيه الألياف لتعطي صفيحة وحيدة الاتجاه، أو توزّع عشوائياً كما في الورق أو اللبّادة. في هذه التشكيلات، توفّر استقامة الألياف إمكان تطوير خواص قريبة من القيم النظرية لخواص الليف الوحيد الاتجاه الحقيقية. لا يمكن تطبيق سيرورات نسج معيّنة أخرى على ألياف الكربون مباشرة، كالحبك الذي يُثني الألياف كثيراً، مؤدّياً إلى تكسّرها بسبب هشاشتها، إلا أن الألياف القائمة على البولي أكريلونيتريل يمكن أن تُحاك على شكل ليف أولي موجّه، حيث يسلك الليف سلوك النسيج، ثم تُحوَّل بالتسخين إلى كربون. ويمكن أيضاً تحويل الألياف الأولية الموجهة إلى خيوط قصيرة بتقطيعها بالمطّ، ثم تُغزل وتُنسج أو تُحاك على شكل قماش وتُعالج حرارياً. إن الخواص الميكانيكية لأقمشة الكربون المصنوعة بهذه الطريقة لا ترتقي إلى تلك التي للألياف المستمرة المصطفة، إلا أنه يمكن نسج أقمشة من هذه الخيوط أنعم كثيراً من تلك المصنوعة من شلل ألياف الكربون المنسوجة.

بناءً على ما تقدم، وإضافة إلى وجود درجات كثيرة مختلفة لليف الكربون، توجد أيضاً أشكال مختلفة كثيرة يمكن أن تُصنع بها. وتثير هذه الحالة مشكلة اختيار أكثر أنواع وأشكال الليف ملاءمة لكل مادة ولاستخدامها النهائي.

## خامات التشكيل المتعدّدة الاتجاهات

الميزة الرئيسة لمواد الـ ك/ك المتعدّدة الاتجاهات هي الحرية في توجيه أنواع ومقادير منتقاة من الألياف لتلائم الأحمال التي يصمَّم من أجلها المكوِّن الإنشائي النهائي. أما مساوئ تقانة التصنيع المتعدّد الاتجاهات فهي تكلفة إنتاج الليف الأولي، ومحدودية حجوم القطع التي يمكن صنعها الناجمة عن محدودية حجوم تجهيزات التشكيل المتاحة، وصعوبة تشريب الحاضنة خلال صفيفات الألياف الثلاثية الأبعاد[42].




**الشكل 3 ـ 11: قماش بسيط النسج بكامل عرضه مع حاشية.**

يقوم أبسط أنواع خامات التشكيل المتعدّدة الاتجاهات على البناء المتعامد الثلاثي الاتجاهات، ويُستخدم عادة لنسج خامات تشكيل مستطيلة (انظر الشكل 3 ـ 11). يتألف هذا النوع من خامة التشكيل الأولية من شلل خيوط متعدّدة متوضّعة وفق الإحداثيات الديكارتية. وتوضع كل شلة على شكل مستقيم للحفاظ على المقدرة الإنشائية العظمى لليف. وتُميَّز خامات التشكيل الأولية بنوع الخيط،

وعدد الخيوط في الشلة، والمسافة الفاصلة بين الشلل المتجاورة، والنسبة الحجمية من الخيط في كل اتجاه، وكثافة خامة التشكيل. ثمة عدد من التعديلات التي يمكن إدخالها في البناء الأساسي المتعامد الثلاثي الاتجاهات بغية الحصول على خامات تشكيل أولية أشدّ تناحياً. وهذا يتحقّق بوضع خيوط في اتجاهات إضافية. وبناءً على مبادئ الهندسة الفراغية، يمكن إنتاج تقويات ذات أنواع مختلفة من توجيه الليف، بدءاً من المتعامدة الثلاثية الاتجاهات حتى تلك التي تتكوّن من 11 اتجاهاً.

**من أنواع خامات التشكيل الأولية الأخرى ما يأتي:**

- خامات نسج قطبية تُستخدم لتشكيل الأسطوانات والأشكال الدوّارة الأخرى. وهي إنشاءات ثلاثية الأبعاد ذات خيوط موجهة وفق الإحداثيات القطبية في اتجهات قطرية ومحورية ومحيطية. تحتوي الخامات الأولية من هذا النوع عادة على نسبة حجمية تساوي 50 في المئة من الألياف التي يمكن إدخالها بالتساوي في الاتجاهات الثلاثة. صحيحٌ أن الخامات الأولية القطبية قد طُوِّرت أصلاً على شكل أسطوانات سميكة الجدار، إلا أنه يمكن الآن صنعها بعدد من الأشكال ذات المقطع الدائري من قبيل الأسطوانات، والمخاريط والمقاطع المتقاربة أو المتباعدة. ويمكن استخدام سيرورة من خطوتين لتكوين أشكال لامتناظرة أسطوانياً من قبيل الحواف الأمامية لأجنحة الطائرات مثلاً، ومجاري تحويل المقاطع المستطيلة إلى مخروطية، أو العكس.

- الأسْدِيَة المتشابكة، وهي أقمشة متعدّدة الطبقات تنتقل فيها خيوط الأسْدِيَة من أحد سطحي القماش إلى الآخر. يمكن جمع ما يصل إلى ثمان طبقات من هذا القماش معاً لتكوين قماش سميك ثنائي الأبعاد.

وإذا كانت ثمة حاجة إلى مقاومة أشد في مستوى القماش، أمكن إضافة خيوط أخرى لتكوين قماش شبه ثلاثي الأبعاد.

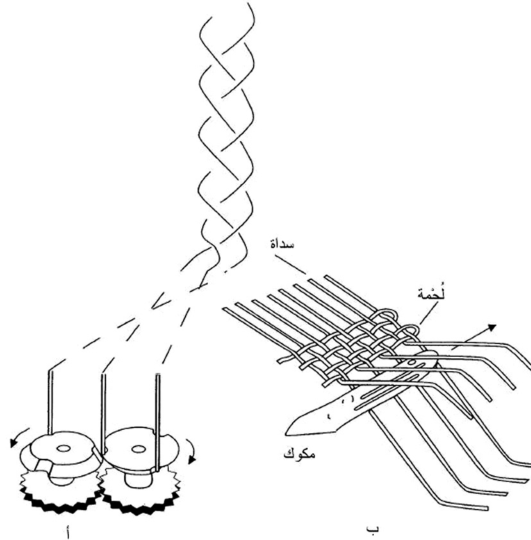
يمكن اعتبار كل من القماش المُخاط والقماش ذي الحياكة الصنارية خامات تشكيل أولية ثلاثية الأبعاد، ذات تقوية في جميع الأبعاد الثلاثة، وإن كان مقدار الألياف في اتجاه الجدل مهمل عادةً. لذا فإن خواص الجدل في كل من هذين القماشين نادراً ما تكون أفضل من خواص المواد الثنائية الأبعاد التي تهيمن الحاضنة فيها.

تتمثَّل معظم الخامات الأولية المتعدّدة الاتجاهات المستخدمة في صناعة الـ ك/ك بالتشكيلات المتعامدة أو القطبية، أو ببعض الأشكال المعدّلة منها. ومن التقنيات المستخدمة لصناعة الخامات الأولية نسْج خيوط جافة [43]، وصنع أقمشة نفوذة [44]، وتجميع خيوط مصلّدة بالراتنج[45]، ولف الفتائل المعدّلة[46]. إلا أن تسريب وتشريب الحاضنة الكربونية أصبحا أشدّ صعوبة مع زيادة سماكة الخامة الأولية وتعقيد التقوية. ولا يمكن استخدام توضيع الأبخرة كيميائياً إلا على المقاطع الرقيقة نسبياً (حتى بضعة سنتيمترات). أما التشريب في الخلاء براتنجات بوليمرية، المتبوع بالتفكيك الحراري، فيعتبر طريقة ممكنة، إلا أن الطريقة الأعلى كفاءة هي سيرورة الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط (Hot Isostatic Pressure Impregnation Carbonization) (HIPIC) باستخدام زفتات النفط أو قطران الفحم حاضنةً أولية.

## الجدْل

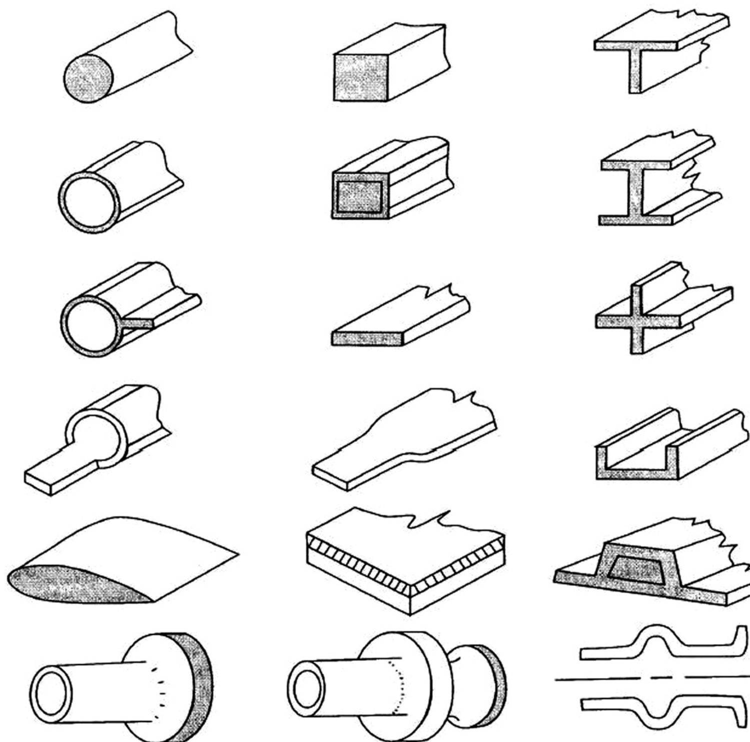
الجدْل هو سيرورة متبعة في صناعة النسيج تُعرف ببساطتها، ويحصل فيها جدْل نوعين أو أكثر من الخيوط لتكوين بنية متكاملة. وتختلف البُنى المجدولة عن القماش المنسوج بطريقة إدخال الخيط في القماش وبالطريقة التي تتشابك بها الخيوط (انظر الشكل 3 ـ 12).

ويُشابه الجدْل لفّ الفتائل من نواح عدة. ويمكن جدْل شلل ألياف جافة، أو شرائط مشرَّبة، بواسطة عمود تشكيل دوّار قابل للفك بطريقة متحكَّم بها لتكوين أشكال متنوّعة ذات ألياف مختلفة التوجيه والنسب الحجمية. لكن لا يمكن للجدْل تحقيق نسبة ليف حجمية عالية مثل لف الفتائل، إلا أنه يمكن أن يُعطي أشكالاً أشدّ تعقيداً. وتوفّر طبيعة التشابك في الجدائل مستوى عالياً من السلامة الإنشائية الضرورية لسهولة التداول والوصل ومقاومة التلف. ويمكن إنقاص تدنّي الخواص بين صفائح المادة المركَّبة باستخدام سيرورات جدْل ثلاثية الأبعاد[47]. أما التوجّه الحالي في تقانة الجدْل فهو التوسّع باتجاه جدائل أكبر قطراً، وتطوير تقنيات أكثر مقدرةً على الجدْل على أعمدة تشكيل معقّدة الأشكال، والجدْل المتعدّد الاتجاهات، وإنتاج خامات أولية قريبة من النهائية (انظر الشكل 3 ـ 13)، والاستخدام المكثّف للتصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب.




**الشكل 3 ـ 12: تقنيات النسج: (أ) جدل، (ب) نسج.**

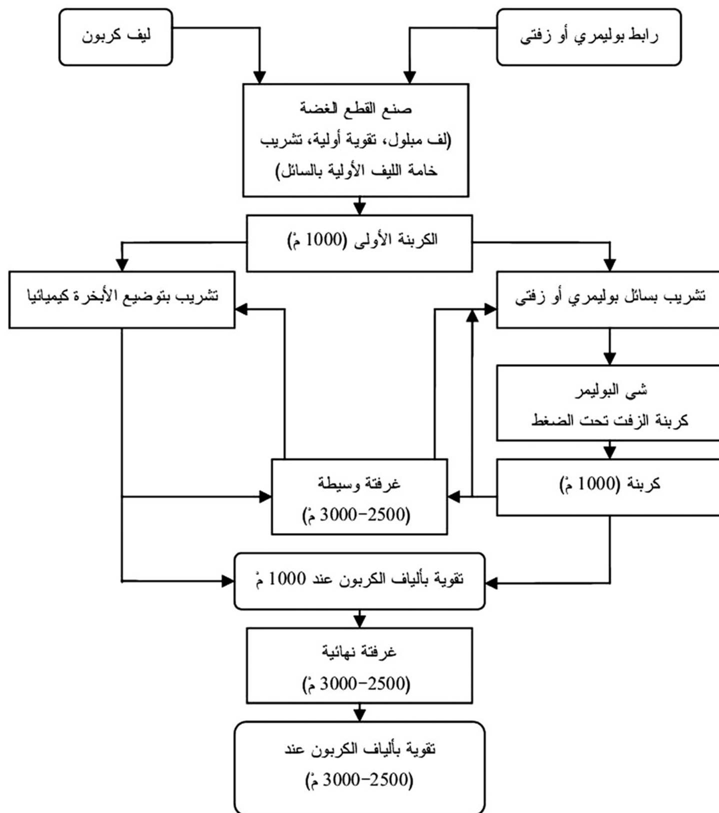
تتكوّن آلة الجدْل النموذجية من قرص تمرير الخيوط وحامل بكرة الخيط ومشكِّل وآلية نقل. وفي بعض الحالات، تُستخدم أقراص متعاكسة الدوران لضمان شد متجانس للخيوط المجدولة (الشكل 3 ـ 12). ويُميَّز الشكل الهندسي للجَديلة الناتجة بزاوية الجدْل $\theta$، التي تساوي نصف زاوية التشابك بين مجموعات الخيوط بالنسبة إلى اتجاه الجدْل (أو الآلة). ويتحدّد تماسك البنية المجدولة بتكرار التشابكات. وتُعرف المسافة بين نقاط التشابك بتباعد اللُحمات. ويُمثَّل عرض أو قطر الجديلة (المسطحة أو الأنبوبية) بـ $d$. فإذا كانت ثمة حاجة إلى تقوية طولانية، أمكن حشر مجموعة ثالثة من الخيوط بين خيوط الجدْل لتكوين جديلة ثلاثية المحاور ذات توجيه للألياف بمقدار $\theta \pm 0°$ درجة. وإذا كانت ثمة حاجة إلى بُنى سماكتها أكبر من ثلاثة خيوط، أمكن جدْل عدة طبقات من القماش بعضاً فوق بعض للحصول على السماكة المطلوبة. ومن أجل تقوية أكبر باتجاه السماكة، يمكن استخدام الجدْل المتعدّد المسارات، أو الجدْل بالصنارة، أو الجدْل الثلاثي الأبعاد لصنع بُنى متكاملة. يتضمن الجدول 3 ـ 6 تصنيفات أنواع الجدْل ومعاييرها. تُعرَّف البُنَى المجدولة المكوّنة من مجموعتين من الخيوط، مع أو من دون خيط ثالث محشور بينهما بأنها جدائل ثنائية الأبعاد. وعندما تُستخدم ثلاث مجموعات خيوط أو أكثر في تشكيل بنية مجدولة متكاملة، فتسمّى الجدْل الثلاثي الأبعاد. يمكن لنظام الجدْل الثلاثي الأبعاد أن يُنتج بُنَى ذات أشكال معقّدة واسعة التنوع، وفق المبيّن في الشكل 3 ـ 13. ويمكن إنتاج بُنى بأي سماكة يُرغب فيها بالانتقاء الملائم لمقاسات حزم الخيوط. ويمكن اختيار توجيه الألياف، ويمكن أيضاً تحقيق تقوية طولية وفق الرغبة بزاوية تساوي الصفر.



**الشكل 3 ـ 13: قطع نهائية الشكل صُنعت بالجدل الثلاثي الأبعاد.**

## **الجدول 3 ـ 6:** تصنيفات الجدْل

| الموسِط | | المستويات | |
|---|---|---|---|
| محور الخيط أبعاد | ثنائي المحاور ثنائي | ثلاثي المحاور ثلاثي | متعدّد المحاور ثلاثي |
| الجديلة الهيئة اتجاه | الأبعاد نهائية التشكيل | الأبعاد ـ عمودي 2/ | الأبعاد شكل قريب |
| الجدْل بناء الجديلة | أفقي 1/1 | 2 | من النهائي عمودي |
| | | | معكوس 3/3 |




**الشكل 3 ـ 14**: **طريقة لإنتاج مواد مركَّبة ك/ك[22].**

## مواد الحاضنة الأولية

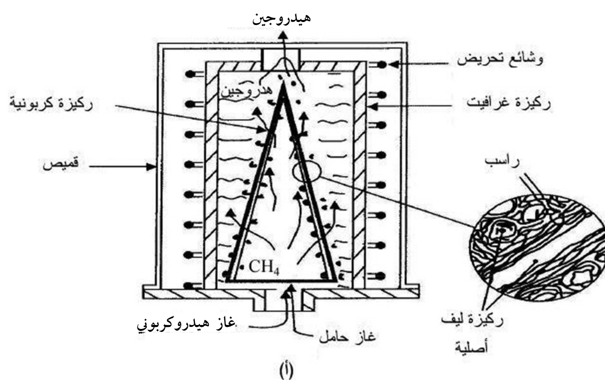
مهما كانت الألياف قوية ومتينة، فإنها لا تمتلك في الواقع المقدرة الإنشائية. لذا، وبغية استخدام خواصها الميكانيكية الممتازة في مواد عملية، لا بد من ضمها ضمن حاضنة للحصول على مادة

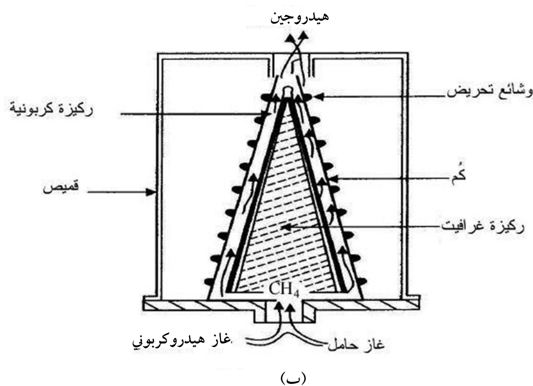
مقوّاة بالألياف. تحتوي المواد المقوّاة بألياف الكربون، ذات الاستخدام الواسع، على حاضنة راتنجية، وثمة تقانة فاعلة لتصنيع هذه المواد بطرائق الطور السائل التي تستخدم معالجة المحلول أو الصُهارة. ونظراً إلى أن الكربون ليس قابلاً للانصهار أو الانحلال في محلول، لا يمكن استخدام تلك التقنيات مباشرة لتحضير الحاضنات الكربونية، إلا أنه يمكن استخدام تقانات الراتنج الموجودة لتصنيع مواد الـ ك/ك. ثمة طريقتان مختلفتان لتكوين حاضنة الـ ك/ك، وكلاهما في قيد الاستخدام منذ أواسط ستينيات القرن العشرين. تقوم الطريقة الأولى على مواد كربونية سائلة تُطلى أو تُشرَّب بها شلل الألياف، ومن ثمَّ تُحوَّل إلى راسب من الكربون بتسخينها في جو خامل. وفي الطريقة الثانية، تُسخَّن ألياف الكربون أولاً في جو خامل، ثم تعرَّض إلى مواد عضوية غازية، من الهيدروكربونات عادة، تتفكك لتوضيع غشاء من الكربون المفكك حرارياً على أسطح الألياف. يبيّن الشكل 3 ـ 14 مخططاً انسيابياً للطريقتين وللعلاقة بينهما. وسوف ننظر في ما يأتي فيهما ببعض التفصيل.

تتضمن الطريقة **الأولى** لتكثيف مواد الـ ك/ك، أو تكوينها بتسريب الأبخرة كيميائياً [48][49] أو بتوضيع الأبخرة كيميائياً، تمرير غاز هيدروكربوني، هو الميثان عادة، عبر خامة تشكيل مسامية عند درجة حرارة بين 1000 و1200 مْ، فيترسّب الكربون في المسامات المفتوحة.

ثمة ثلاث طرائق لتكثيف مواد الـ ك/ك بتقنية توضيع الأبخرة كيميائياً. تتضمن الأولى منها تسخيناً متجانساً لبُنيَة خامة التشكيل المسامية، في فرن تحريض كهربائي، حتى درجة حرارة بين 950 و1100 درجة. ويُبقى الجو ضمن الفرن عند ضغوط بين 100 و000 20 باسكال. في هذه الظروف، ينتشر الغاز الهيدروكربوني المتفاعل في المسام المفتوحة لخامة التشكيل. تتطلب طريقة التسخين المتجانس

هذه من 60 حتى 120 ساعة لكل دورة تكثيف (انظر الشكل 3 ـ 15 ـ أ). أما رواسب الكربون الناتجة بطريقة التسخين المتجانس فهي ذات كثافة عالية، ومُعامل يونغ كبير، وقابلية عالية للغرفتة. والمزية الأخرى لهذه الطريقة هي أنه يمكن تكثيف كثير من الخامات الأولية في الوقت نفسه في الفرن نفسه. أما عيبها، فهو مدة المعالجة الطويلة.




**الشكل 3 ـ 15: (أ) رسم توضيحي لفرن تحريضي بتقنية توضيع الأبخرة كيميائياً المتساوي الحرارة، (ب) رسم توضيحي لفرن تحريضي مع تقانة توضيع الأبخرة كيميائياً ذات التدرج الحراري.**

في الطريقة **الثانية**، يُولَّد تدرُّج للضغط على طول الخامة المسخنة تسخيناً متجانساً. فيُجبر الغاز الهيدروكربوني على التسرّب خلال مسامات الخامة المفتوحة. يقلِّص تدرُّج الضغط مدة تسرّب الهيدروكربوني، ويُنتج توضيعاً متجانساً للكربون على ركيزة خامة التشكيل.

أما الطريقة **الثالثة** لتكثيف خامة التشكيل لمواد الـ ك/ك بتوضيع الأبخرة كيميائياً، فتقوم على إيجاد تدرّج حراري عبر سماكة الخامة[50]، يُترك الضغط داخل الفرن مساوياً للضغط الجوي. ويتدفق الغاز الهيدروكربوني عبر سطح الخامة. وتُترك الخامة عند درجة حرارة أقل من عتبة حرارة التفكك الحراري للغاز. في هذه الطريقة تفصَّل وشيعة التحريض وحامل الخامة وفقاً للشكل الهندسي للركيزة (انظر الشكل 3 ـ 15 ـ ب)، ويحصل فيها توضُّع الكربون على السطح الخارجي للركيزة أولاً. يُعتبر تكثُّف مادة الـ ك/ك بطريقة التدرّج الحراري أسرع عموماً من الطريقتين المذكورتين آنفاً. أما العيوب الرئيسة لهذه الطريقة فهي انخفاض قابليتها لإعادة إنتاج المواصفات ذاتها، والتوضيع غير المتجانس للكربون ضمن خامة التشكيل، والحاجة إلى وشيعة خاصة بكل خامة، وعدم إمكان إنتاج أكثر من خامة واحدة في الوقت نفسه[24][50][51].

تتأثر خواص مواد الـ ك/ك المنتَجة بطرائق توضيع الأبخرة كيميائياً كثيراً بسِماتها الشكلية وبظروف معالجتها، وعلى وجه الخصوص بدرجة حرارة التفاعل[51].

الطريقة **الثانية** لتكثيف الـ ك/ك هي استخدام زفت النفط أو قطران الفحم. ونظراً إلى أن الزفتات حرارية التلدُّن، فإنها تُستخدم غالباً لزيادة التكثيف، أي التكثيف الإضافي لبنية ك/ك كانت قد «صُلِّدت» في خطوة تشريب وتكثيف سابقة (خامة تشكيل قماشية

مشرَّبة بالراتنج)، أو لها صلابة كافية ناجمة عن الاحتكاك بين عناصر البنية المنسوجة (كخامة التشكيل المجدولة الثلاثية الأبعاد)[51][50].

تُعدُّ الزفتات فريدة من حيث تحوّلها إلى بلّورات سائلة عند درجات حرارة بين 350 و550 مْ[52]. في هذا التحويل، تصطف الجُزَيئات الشرائحية الكبيرة، الناتجة من تفاعلات التكسّر أو التحطيم الحراري والبلمرة العطرية، على نحو متوازٍ لتشكّل بلّورات سائلة غير متناحية بصرياً تُعرف بالطور الوسطي الكربوني[53]. إن إحدى صفات الحاضنة القائمة على الطور الوسطي هي الكثافة الكتلية العالية التي تتحقَّق لأن كثافة الحاضنة يمكن أن تقترب من قيمة كثافة الغرافيت الأحادي البلّورة التي تساوي 2.26 غ/سم$^3$.

وباستخدام الزفتات المكربنة تحت الضغط الجوي، تكون إنتاجية فحم الكوك من رتبة 50 ـ 60 في المئة، والكثافات المشرَّبة نحو 1.35 غ/سم$^3$، ووفقاً لما ذكرنا، تكون كثافات الحاضنات المشتقة من الزفت نحو 2.2 غ/سم$^3$. عند هذه القيم، يُري الحساب أن كفاءة التكثيف الحجمي لا تتجاوز 30 ـ 40 في المئة عند الضغط الجوي[54]. لكن باللجوء إلى ما يسمّى الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط (HIPIC)، عند ضغط يساوي 100.3 ميغا باسكال، فإنه يمكن زيادة إنتاجية الزفتات للكربون حتى 90 في المئة تقريباً[41]. لكن حتى في هذه الحالة، فإن التعبئة الحجمية لا تتجاوز 55 في المئة. لذا، وبوجود خامة تشكيل ذات مسامية أولية تساوي 45 في المئة، وهي شائعة في كثير من البُنى المنسوجة الثلاثية الأبعاد، فإن ثمة حاجة إلى ثلاث دورات تكثيف بكفاءة عظمى لخفض المسامية حتى 4 في المئة. لكن باتباع إجراءات الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط الحالية، وُجد أن ثمة حاجة إلى خمس دورات على الأقل، عند ضغط يساوي 100.3 ميغا باسكال، لتحقيق هذا المستوى نفسه من المسامية.

يسمّي بعض الباحثين طريقة تصنيع مواد الـ ك/ك تلك بسيرورة تشريب السائل، التي تتضمن تشريب خامة التشكيل بالزفت أو بمواد عضوية أخرى، ثم إعادة الكربنة. وبغية تحقيق الخواص المطلوبة (كثافة عالية، مقاومة شد كبيرة ومعامل يونغ كبير، ناقلية حرارية ضعيفة)، يجب تكرار خطوة التشريب والكربنة. وثمة حاجة إلى استمثال عدد الدورات من ناحية ظروف السيرورة، ومن ناحية الليف والمادة الأولية[55]. إن الخاصية المهمة للمواد الأولية لسيرورة تشريب السائل هي إنتاجية الكربون العالية والضياع الوزني القليل (انظر الجدول 3 ـ 7).

**الجدول 3 ـ 7**: مقارنة الخواص والصفات المميِّزة للحاضنات الكربونية المشتقة من طور بخاري وزفت ومواد أولية راتنجية

| | نوع الحاضنة الكربونية | | |
|---|---|---|---|
| **الصفة المميِّزة أو الخاصية** | **طور بخاري مرسَّب CVD** | **زفت** | **راتنج** |
| الكثافة | عالية، 2000 كغ/م$^3$، باستثناء الصيغة المتناحية | عالية، وتزداد بالمعالجة الحرارية عند درجات حرارة تصل إلى درجة حرارة الغرفة. | منخفضة: 1300–1600 كغ/م$^3$. |
| إنتاجية الكربون | توضيع مباشر للكربون، لا يوجد تفكك حراري إضافي. متغيرة وفقاً لتركيب الزفت: 50–80 في المئة و. | نحو 50٪ في حالة الفينوليكات، وتزداد حتى 85٪ في حالة البولي فينيلات. | |
| المسامية | منخفضة، باستثناء الصيغة المتناحية. صدوع صفيحية. | مسامات كبيرة تحتجز الغاز إضافة إلى صدوع تقلص وإجهاد حراري. | مسامية ميكرويّة كثيفة (قطر المسام < 1,0 نم)، وتصبح مغلقة عند حرارة أعلى من 1000 مْ. يمكن أن تكون ثمة فراغات كبيرة بسبب تكون البخار في أثناء شيْ الراتنج. |

**الجدول 3ـ7 (تابع)**: مقارنة الخواص والصفات المميِّزة للحاضنات الكربونية المشتقة من طور بخاري وزفت ومواد أولية راتنجية

| | نوع الحاضنة الكربونية | | |
|---|---|---|---|
| **الصفة المميِّزة أو الخاصية** | **طور بخاري مرسَّب CVD** | **زفت** | **راتنج** |
| البنية الميكرويّة (في الحالة الكتلية) | تختلف من متناحية حتى صفيحية شديدة التوجيه. | مناطق جهرية (1–100 ميكرون) تُظهر توجهات مفضلة تنجم عن حالة الطور الوسطي. | متناح إلا في المستوى النانوي، حيث تكون الكينونات الصغرى الأساسية موجهة عشوائياً. |
| آثار التوجيه ضمن خامة تشكيل الليف | توجيه قوي للحاضنة الصفيحية مواز لأسطح الألياف. توجيه أيضاً مواز لأسطح الصدوع ضمن أنواع الحاضنات الأخرى إذا عوجلت في ما بعد بتسريب الأبخرة كيميائياً. | توجيه مفضل للشرائح مواز لأسطح الألياف. يتزايد مع تكوين البنية الغرافيتية في أثناء المعالجة الحرارية. يتعدل بالتفكك الحراري الكيميائي تحت الضغط. | التوجيه المفضل نحو أسطح الألياف، لكنه أقل كثيرا من ذلك الموجود في مواد أولية أخرى. يزداد بالمعالجة الحرارية. |
| قابلية الغرفتة/ التبلور | الصيغ الخطية قابلة جدا للغرفتة. يُصبح Lc وLa > 200 نم بعد المعالجة الحرارية فوق 3000 مْ. | قابلية عالية للغرفتة. Lc وLa أقل من 100 نم عادة. | لا يتغرفت عادة |
| النقاوة/ التحكم بالتركيب | متحكَّم فيها بتركيب الطور الغازي، الذي يمكِّن من تضمين عناصر أخرى في الراسب (مثل السليكون والبورون) | تحكُّم بواسطة المصدر، ويمكن أن تكون النقاوة عالية. ليس من السهل تضمين عناصر أخرى إلا على شكل مسحوق. | كنقاوة الزفت |
| التفاعل مع الغازات المؤكسدة | ضعيف جداً في حالة الغرافيت الحراري العالي التوجيه | ضعيف، ويتناقص بالمعالجة الحرارية | شديد عادة بسبب شبكة المسامات الميكرويّة، ويتناقص بالمعالجة الحرارية، لكن يبقى قوياً نسبياً. |

## تابع الجدول 3ـ7 :

| | نوع الحاضنة الكربونية | | |
|---|---|---|---|
| **الصفة المميّزة أو الخاصية** | **طور بخاري مرسَّب CVD** | **زفت** | **راتنج** |
| التمدّد الحراري | يعتمد على التوجيه المفضل. يمكن أن يكون شديد اللاتناحي، مقارباً للقيم التي للبلّورات في الاتجاهين الرئيسين. | يعتمد على توجيه الحقل. يحصل التمدّد بمساعدة الصدوع الشريحية. 1–5 × $10^{-6}$ للكلفن. | متناح كتلياً. ~ 3 × $10^{-6}$ للكلفن. |
| الناقلية الحرارية والكهربائية | تعتمد على التوجيه المفضل، وتقارب تلك التي للغرافيت الوحيد البلّورة. | تعتمد على توجيه المنطقة، وعلى حرارة المعالجة الحرارية والمسامية الداخلية. تزداد بالمعالجة الحرارية. | متناحية كتلياً. |
| معامل يونغ | 7–40 جيغا باسكال تبعاً للبنية. | 5–10 جيغا باسكال تبعاً لحجم الحبيْبة والمسامية ودرجة الغرفتة. وتصل القيمة إلى 14 جيغا باسكال للمواد ذات الحبيبات الناعمة جداً (1 ميكرون). | 10–30 جيغا باسكال. |
| مقاومة الشد | تعتمد على البنية الميكرويّة وعلى درجة الغرفتة: 10–500 ميغا باسكال. | تعتمد على المسامية والشكل الهندسي للمسامات. 10–50 ميغا باسكال لمعظم أنواع الكربون المتعدّدة البلّورات والغرافيتات وترتفع إلى 120 ميغا باسكال للغرافيتات ذات الحبيبات الناعمة جداً (1 ميكرون) | 80–150 ميغا باسكال تقريباً لأنواع الكربون الزجاجية. وهي أخفض في أنواع الكربون الراتنجية تبعاً للمسامية. |
| مقدار التشوّه قبل الانقطاع | 0,2–0,3 في المئة تبعاً للبنية. وتحصل قيم أعلى عند درجات حرارة التوضيع والمعالجة الحرارية القصوى. | يصل إلى نحو 0,3 في المئة تبعاً لحجم الحبيْبة ودرجة الغرفتة. | يصل إلى نحو 0,4 في المئة وتكون القيم الكبيرة للكربون الزجاجي عند درجة حرارة معالجة عالية. |

يمكن اشتقاق حاضنات الـ ك/ك، المنتَجة بطريقة سيرورة تشريب السائل، إما من مواد أولية راتنجية حرارية التصليد، أو من الزفت. من الراتنجات الحرارية التصليد نذكر البولي بنزيميدازول (Polybenzimidazole)، والبولي فينيلين (Polyphenylene)، وثنائي فينول فورم ألدهيد (Biphenol formaldehyde)، وكحول الفرفوريل (Furfuryl Alcohol)، والفينول فورم ألدهيد (الفينوليك) (Phenol (Formaldehyde) (Phenolic)، والإيبوكسي نوفالاك (Evoxv novalac)، والبولي إيميد (Polyimide).

يمكن كربنة الراتنجات الحرارية التصليد بسهولة عند ضغوط منخفضة. فهي عموماً تتصف باللزوجة الضعيفة، والتبليل الشديد لأسطح خامة التشكيل، وقابلية الشَيْ قبل الكربنة. وهذا يمكِّن من درء ضياع السائل في أثناء التسخين[9]. من هذه الناحية، تُعدُّ الراتنجات الحرارية التصليد أفضل من زفت قطران الفحم.

إن مجموعة المواد الأخيرة التي يمكن أن تُستخدم في مواد الـ ك/ك هي الراتنجات الحرارية التصليد (انظر الجدول 3 ـ 7). يمكن معالجة حاضنات الراتنج الحرارية التصليد إما بالتفكيك الحراري لخامة أولية مشربة جافة، أو بصنع قطع مركَّبة من أشرطة أو جدائل أو قماش منسوج أو ألياف قصيرة، جميعها مشرّبة بالراتنج. وتتضمن التقنية، التي تُعالَج بها الحاضنات المشتقة من الراتنجات الحرارية التصليد، تشريب الخامة الأولية في الخلاء، متبوعاً بسيرورتي الشَيْ وما بعد الشَيْ. ثم تُفكَّك المادة حرارياً عند درجة حرارة تقع بين 650 و1000 مْ. ثم تُنقل القطعة إلى فرن تحريضي وتسخَّن حتى درجة تقع بين 2600 و2750 مْ، ويعتمد معدل التسخين على حجم وشكل القطعة. وتكرر دورة التشريب والتسخين بغية تكثيف البنية، لأن كثافة المادة تتأثر كثيراً بعدد دورات التشريب والتسخين[24]. بعد عدة

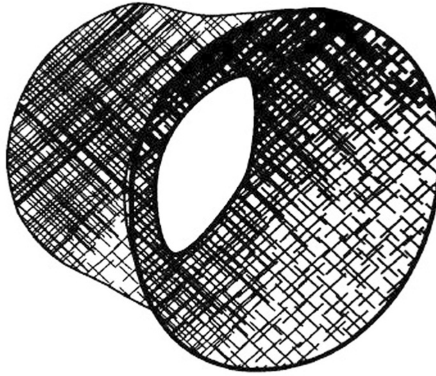
دورات (نحو سبع دورات)، تقارب مقاومة الحاضنة للشدّ تلك التي للخامة الأولية المفكَّكة، منتجة مادة مركَّبة ذات مقاومة شدّ كبيرة.

تُستخدم عادة في تصنيع مواد الـ ك/ك الأشرطة والجدائل والقماش المنسوج والألياف القصيرة، المشرّبة جميعاً بالراتنج. وإحدى التقنيات الشائعة لصناعة فوهات عوادم الصواريخ تستخدم أقمشة منسوجة ثلاثية الأبعاد. يتضمن تصنيع فوهة العادم في الصاروخ[26] قولبة وشَيْ القماش المنسوج بعد تشريبه براتنج الفينوليك. ويتبع ذلك تقطيع وتفكيك حراري لطرد الغازات والرطوبة من القماش. ثم تُشرَّب القطعة بكحول الفرفوريل وتُفكَّك حرارياً وكيميائياً، لأن كثافتها ومقاومتها للشدّ تتزايد بعد كل دورة. ثم تُطلى بمسحوق سيراميكي مكوّن من السليكا والألومينا، وتُسخَّن حتى درجة حرارة تساوي 1650 مْ تقريباً. نتيجة ذلك، يتشكّل كربيد السليكون على سطحها. وتكوِّن المعالجة الإضافية برباعي إيثيل ـ أورثوسيليكات (Tetraethyl-orthosilicate)، ومن بعدها الشَيّ، راسباً من ثاني أُكسيد السليكون على السطح لحماية الكربون. يبيّن الشكل 3 ـ 16[9] فوهة عادم صاروخ بشكلها النهائي بعد أن جرى تصنيعها من قماش منسوج ثلاثي الأبعاد مشرّب براتنج حراري التصليد.

تصبح الحاضنات المصنوعة من الراتنج الحراري التصليد عموماً متناحية ولامتبلورة من حيث خواصها وبنيتها الميكرويّة حينما تُعالج حرارياً عند درجات حرارة تقل عن 600 مْ[11].

لقد جرى تطوير عدة تقنيات جديدة لصنع مواد الـ ك/ك، وهي في قيد الإنتاج [56]. تتضمن طريقة جديدة لصنع خيط أولي، سُجِّلت اختراعاً، إنتاج خيط يتكوّن من حزمة من ألياف الكربون ضمن مادة حاضنة أولية من مساحيق فحم الكوك والزفت، يُغلَّف الرابط الخيط بكُمٍّ مرن حراري التلدُّن لاحتواء المساحيق في أثناء التداول

والمعالجة اللاحقة. تضمن سيرورة التصنيع المبسطة هذه نفاذاً أفضل للرابط عبر حزمة ألياف الكربون، معطيةً بذلك مقاومة شدّ أعلى من تلك التي تتصف بها مواد الـ ك/ك المعهودة. يضاف إلى ذلك أن المساحيق الحاضنة تُشتق غالباً من رواسب معالجة النفط، الأمر الذي ينطوي على مفاعيل بيئية مفيدة.



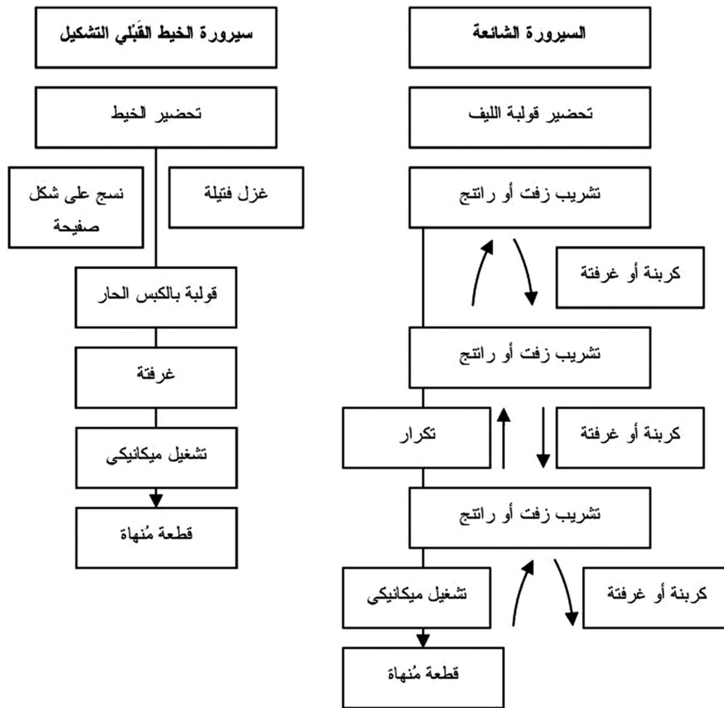
**الشكل 3 ـ 16: قطعة صاروخ نهائية الشكل مصنوعة من قماش منسوج ثلاثي الأبعاد باستخدام مادة أولية من راتنج حراري التصليد.**

لقد بيَّنت الأبحاث أن مواد الـ ك/ك الوحيدة الاتجاه المصنوعة بهذه الطريقة المبسّطة تتصف بمقاومة شدّ تتراوح بين 414 و670 ميغا باسكال، مقارنة بـ 70 ميغا باسكال في مواد الـ ك/ك المعهودة. وهي تُبدي أيضاً مُعامل ثني أعلى بقدر ملحوظ.

يمكن نسْج الخيط الأولي على شكل صفيحة، أو يمكن تقطيعه لملء قالب، ثم يُكبس حرارياً لتكوين المادة المركَّبة النهائية. ونظراً إلى أن ألياف التقوية تنتشر انتشاراً متجانساً ضمن الحاضنة، فإن خواص المادة الناتج تكون متجانسة تجانساً جيداً.

تتصف الخيوط الأولية بقابلية ممتازة للتشغيل والمعالجة. على سبيل المثال، يمكن تصنيع خامات أولية لها شكل الأنبوب أو

القضيب أو البوتقة، إضافة إلى الصفائح الوحيدة الاتجاه، والأقمشة، والنسُج السميكة، والشرائط والخيوط المفرومة. وتمكِّن قابلية الخيوط الأولية للتشغيل من تفصيل المادة كي تتحمَّل الأحمال التصميمية المختلفة. وهذه الطريقة ملائمة جداً أيضاً لإنتاج أشكال ومكوّنات معقدة لها أنصاف أقطار تحدّب صغيرة.




**الشكل 3 ـ 17: تقلِّص الخيوط القَبْلية التشكيل عدد الخطوات اللازمة لصنع المواد المركَّبة مقارنة بالطرائق الشائعة.**

وهذه المواد متوافرة بشكل غير مشغَّل، وعلى شكل منتجات نهائية كالنوابض اللولبية والقضبان والرفوف والبراغي والعزقات

وسيور النقل وأجزاء عربات النقل وأجزاء الأفران. يُري الشكل 3 ـ 17 مقارنة بين سيرورة الخيط القَبْلي والطرائق الشائعة المذكورة آنفاً.

أما الطريقتان المتبقيتان فتبدوان واعدتين لتجاوز مشكلة فرط التغشية، وتقليص مدد معالجة التشققات من أسابيع أو أشهر إلى ساعات.

يُستخدم في التقنية الأولى التغطيس في سائل بدلاً من التشريب بالبخار أو الراتنج. في البداية، توضع خامة أولية من ألياف الكربون ضمن مفاعل فيه مادة أولية سائلة تحتوي على الكربون. المفاعل صغير نسبياً، أي إن ارتفاعه من رتبة الخمسة سنتيمترات. تُغطس الخامة الأولية في السائل وتسخَّن كهربائياً من خلال مقاومتها الكهربائية. فيغلي السائل المحيط بها عند درجات حرارة عالية بمقدار يكفي لفصل ذرّاتها الهيدروجينية وتوضيع الكربون على الخامة.

يوفّر استخدام السائل مزايا عديدة أهمها منع حصول التغشية المفرطة، فالبخار الناجم عن الغلي حول القطعة يسحب الحرارة بعيداً عن الحواف. وهذا يبرِّد السطح الخارجي، وبذلك يحصل التوضيع في المركز حيث تكون الخامة أسخن ما يمكن.

ونظراً إلى أن هذه السيرورة تكثّف المركز تلقائياً أولاً، فإنها تؤدّي إلى عدم ضرورة تحديد مدة المعالجة. ونتيجة ذلك، ليست ثمة حاجة إلى جعل سرعة التوضيع محدودة لدرء التغشية المفرطة للخامة. عملياً، يزيد اضطراب السائل في أثناء غليانه سرعة التوضيع.

أُنتجت بهذه الطريقة أقراص مكابح تامة التكثُّف بأقطار تساوي 32.5 سم خلال 8 ساعات فقط. ويُتوقع أن تخفض هذه السيرورة أيضاً تكاليف البنية التحتية. فنظراً إلى أن الخامة الأولية تُسخَّن من خلال مقاومتها الكهربائية من دون الحاجة إلى تسخين المفاعل

برمته، تنتفي الحاجة إلى الأفران الغالية الثمن. ويبدو أيضاً أن هذه السيرورة قابلة أيضاً للأتمتة واستخدام التحكم البسيط المغلق الحلقة.

وتقوم الطريقة الثانية على منظومة تسريب كيميائي للبخار CVI أكثر تطوراً تسمّى تسريب البخار كيميائياً مع التدفق الحراري المتدرّج. يمكن لهذه السيرورة صنع قطع تساوي سماكاتها 1 سم خلال نحو 2.75 ساعة، بدلاً من مئات الساعات التي تتطلبها سيرورة التسريب الكيميائي للبخار العادية، فعوضاً عن وضع الخامة الأولية في الفرن وترك الأحداث تحصل بالتغلغل البطيء، يُنفخ غاز فيها.

تقوم هذه السيرورة على نظام طُوِّر قبل 15 سنة تقريباً لإنتاج مواد سيراميكية، ويُستخدم فيها الضغط لدفع بخار البروبيلين، أو البروبان أو الميثان المحتوي على الكربون عبر خامات مسخَّنة حتى 1200 مْ.

يكمن مفتاح سرعة المعالجة في توليد تدرُّج حراري ضمن الخامة الأولية. وهذا يتيح تدفق البخار فوق القطعة من دون الخشية من التغشية المفرطة، أي تغشية الحواف الخارجية. وهو يوفّر أيضاً نافذة ظروف للمعالجة أوسع، إضافة إلى إمكان تفصيل بُنى الـ ك/ك الميكرويّة وفق الرغبة، لأن من الممكن اختيار درجة الحرارة والضغط وظروف الكشف التي تعطي المواصفات المطلوبة. لذا يستطيع الباحثون تفصيل البنية وتحسين الخواص التي هي من قبيل الناقلية الحرارية أو الصلابة وفق الحاجة. ويمكن أيضاً أن تسمح بإضافة محفزات غرفتة خاصة وموانع أكسدة إلى المادة المقوّاة بالألياف في أثناء تكوُّنها.

لقد أنتج الباحثون بهذه الطريقة حتى الآن أكثر من عشر قطع

من الـ ك/ك، تصل سماكة بعضها حتى 2 سم، تضاهي في جودتها جودة تلك المُنتَجة بالسيرورات المعهودة. إلا أن مشكلة التثبيت كانت أكبر عائق أمام تسويق هذه التقنية، فتثبيت الخامة على نحو يتدفق فيه الغاز فوقها تدفقاً مناسباً يتطلب تجهيزات معقدة.

تَعِد السيرورتان المذكورتان بمدد معالجة أقصر، وهذا يجب أن يؤدّي إلى تخفيض التكاليف. صحيحٌ أن أحداً لم يحل فعلاً مشاكل أكسدة الـ ك/ك، إلا أن السعر المنخفض يجب أن يؤدّي في النهاية إلى تطبيقات لها في الإنشاءات والعنفات وإلكترونيات الطيران (للتحكم في الحرارة).

## خواص الكربون/ كربون المهمة

### الخواص الميكانيكية

تتحدَّد الخواص الإنشائية لمواد الألياف المستمرة المتقدمة عموماً بخواص الألياف ونسبها الحجمية وأشكالها الهندسية. لكن مواد الـ ك/ك معقّدة جداً بطبيعتها نتيجة التغيرات والتفاعلات الفيزيائية والكيميائية التي تحدث في أثناء المعالجة. فمثلاً، التفكيك الكيميائي حرارياً لمادة أولية عضوية بغية تكوين حاضنة كربونية يؤدّي إلى انخفاض في الحجم بنسبة 50 في المئة. ويمكن لتقلُّص بهذا المقدار أن يؤدّي إلى أذى كبير للمادة المركَّبة بسبب نشوء إجهادات شديدة ذات صلة بسيرورة المعالجة(1). إن التحوُّل من ملتقى ليف كربوني/مادة عضوية إلى رابط ليفي في الـ ك/ك سوف يتغير كثيراً تبعاً لمتغيرات المواد والسيرورة. فالمعالجة الحرارية المُطوَّلة، والإجهادات الناجمة عن السيرورة، والتفاعلات بين الليف

والحاضنة، يمكنها بأرجحية عظمى أن تؤثر تأثيراً سيئاً في الخواص الرئيسة للتقوية بالألياف[60][61]. وتؤدّي الإجهادات الحرارية الشديدة، الناجمة عن عدم توافق التمدّد الحراري بين الألياف والحاضنة، وبين بُنى الحاضنة المختلفة، إلى تدنٍّ تابع للزمن في خواص المادة المركَّبة الميكانيكية في أثناء المعالجة الحرارية والدورات الحرارية خلال الخدمة.

بالنظر إلى المواد المقوّاة بالألياف جميعاً، فإن الخواص الميكانيكية لمادة ك/ك تُبدي لاتناحياً واضحاً نتيجة لاتناحي الألياف. وفي حالة الألياف الوحيدة الاتجاه، تنصّ نظرية الإجهاد الكبير على أن مقاومة الشدّ في الليف تكون واضحة عندما لا تزيد الزاوية $\theta$ بين اتجاه الحمل المطبق ومحور الليف عن أربع درجات. وإذا تجاوزت تلك القيمة، فإن المقاومة $\sigma_{11}$ تصبح محكومة بمقاومة القص $\tau$ وفق العلاقة:

$$\sigma_{11} = \tau / \sin\theta \cos\theta \qquad (3.1)$$

وإذا تجاوزت $\theta$ القيمة 24 درجة، اقتربت هذه المقاومة من مقاومة الحاضنة.

ويمكن التعبير عن مقاومة المادة المركَّبة للشد $\sigma_c$ في اتجاه محور الليف في مادة أليافها وحيدة الاتجاه وفق قاعدة المزيج البسيطة:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \qquad (3.2)$$

حيث $\sigma_f$ هي مقاومة الليف، و $\sigma_m$ مقاومة الحاضنة، و$V_f$ النسبة الحجمية من الليف. ويمكن إهمال مقاومة الحاضنة عموماً حين مقارنتها بمقاومة الألياف، فتكون عندئذٍ مقاومة المادة المركَّبة متناسبة مع محتواها من الألياف.

إنه لمن الصعب في التطبيقات العملية تحقيق المقاومة النظرية لمادة مركَّبة بسبب انحناء الألياف وتشوّهها والتفاوتات في اتجاهاتها، إضافة إلى تراكيز الإجهاد المقترنة بطريقة الاختبار. أكثر من هذا، إذا تجاوزت نسبة الألياف 70 في المئة من المادة، أصبح تشريبها بالحاضنة تشريباً متجانساً مستحيلاً، وهذا يؤدّي إلى نقصان المقاومة. وتؤدّي المسامية الكبيرة غير المنتظمة، والملتقيات السيئة بين الليف والحاضنة، والهشاشة المتأصلة في المنظومة إلى عدم وصول مقاومة الـ ك/ك إلى القيمة النظرية، بل إلى نحو 50 ـ 60 في المئة منها فقط. إن القاعدة العملية المتّبعة عادةً لتقدير المقاومة هي افتراض أن مقاومة المادة المتوازنة المقوّاة بقماش منسوج (أو ذات التوضّع الوحيد الاتجاه بزاوية 0 أو 90 درجة) تساوي تقريباً نصف مقاومة المادة الوحيدة الاتجاه، وأن مقاومة المادة المقوّاة بصفائح شبه متناحية تساوي ثلث مقاومتها.

ولا تخضع عموماً مقاومة الشدّ في المواد المركَّبة ك/ك إلى علاقة قانون المزائج البسيط. فالرابط الضعيف بين الألياف والحاضنة يؤدّي إلى نقل غير فاعل للأحمال المطبقة إلى التقوية الليفية، وهذا يعني أن الوصول إلى المقاومة النظرية شبه مستحيل. إن قيم الخواص الميكانيكية للـ ك/ك تقل بمقدار يختلف بين 10 و60 في المئة عن القيم المحسوبة بقاعدة المزيج، لكن من الممكن زيادة مقاومة ملتقى الليف والحاضنة، إلا أن هذه الزيادة تتجلّى، وفق ما ذُكر آنفاً، في هشاشة شديدة للمادة المركَّبة.

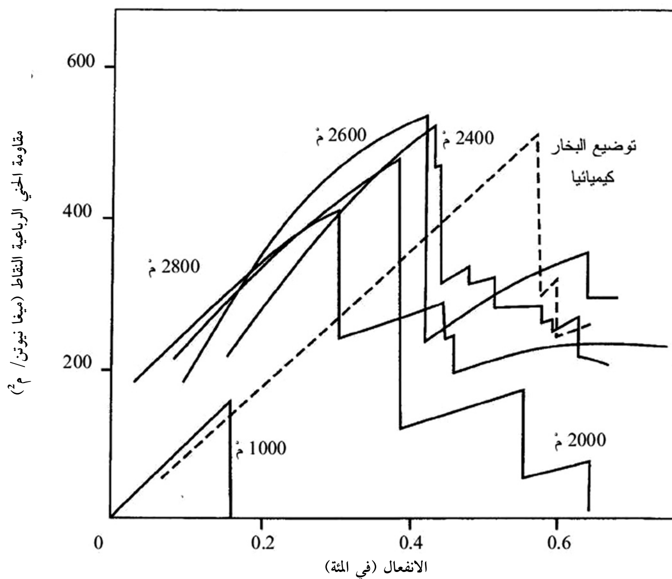
تتحدَّد الخواص الميكانيكية لمواد الـ ك/ك إلى حد بعيد بخواص الألياف التي تعتمد على نوع المادة الأولية وظروف المعالجة، فالتغيّرات البنيوية الميكرويّة في الشكل والمسامية والمقطع العرضاني يمكن أن تحصل ضمن الفتائل. أما تأثير تغيّرات الليف البنيانية في خواص الـ ك/ك الحرارية الميكانيكية، فهي ليست مفهومة

تماماً، إلا أنه يُفترض أنها يمكن أن تؤدّي إلى توزُّع غير متجانس للخواص ضمن المادة المركَّبة. ويؤدّي مثل هذا التوزُّع إلى إجهاد قليل في بعض الألياف، وشديد في ألياف أخرى مجاورة[62]. لذا فإن العامل الحاسم في الاستخدام الأمثلي للألياف هو الاصطفاف الجيد بالنسبة إلى محور الحمل[63]. تُري منحنيات الإجهاد والتشوّه في المواد الثنائية والثلاثية الأبعاد تدنياً في خواص الألياف، وتأخذ أشكالاً لاخطية نتيجة الاصطفاف غير الصحيح الناجم عن «التجعدات» التي تُحدثها سيرورة النسْج. هنا لا تكون الألياف مصطفة موازية لمحور الإجهاد الرئيس، ولذا تنخفض مقاومتها الفاعلة.

هذا في ما يخص مواد الـ ك/ك المقوّاة بالألياف بوجه عام، إلا أن أفضل الخواص الميكانيكية تتحقَّق حين استخدام بولي أكريلونيتريل أو ليف طور وسطي قائم على الزفت، لهما مُعَامل يونغ كبير، ويفضل ألا تكون ثمة معالجة سطوح لهما. إذا لم تكن الألياف ذات مُعَامل يونغ الكبير معالجة سطحياً، فإن التصاقها بالراتنج يكون ضعيفاً جداً، ولذا يكون التقلُّص الإجمالي في المقطع العرضاني حين التفكيك الكيميائي حرارياً قليلاً جداً. أما في حالة الألياف المتناحية ذات مُعَامل يونغ المتوسط، وعلى وجه الخصوص تلك التي عولجت سطوحها، فتؤدّي الكربنة الأولى إلى تقلُّص كبير نتيجة الالتصاق الجيد بين الليف والحاضنة. يقاوَم تقلُّص الراتنج بقابلية الألياف الضعيفة للانضغاط، ونتيجة ذلك تتكوَّن في الألياف درجة عالية من الإجهاد الأولي الضاغط، مؤدية إلى انخفاض مقاومة المادة المركَّبة للشد.

إن المؤثِّر الرئيس في الخواص الميكانيكية لمواد الـ ك/ك المُنتَجة من مواد أولية راتنجية حرارية التصليد هو درجة حرارة المعالجة الحرارية[65] فعند درجة حرارة تقل عن 2000 مْ، تكون

مقاومة الشدّ ضعيفة، ويكون التصدّع الناجم عن الهشاشة هو نمط الانهيار المهيمن. حينئذٍ، تكون الحاضنة المشكَّلة بهذه الطريقة حاضنة من الكربون الزجاجي الهش المتناحي، تقطِّع الصدوع المنتشرة فيها الألياف، من دون أن تغيّر اتجاهها. وعند درجة حرارة معالجة حرارية أعلى من 2400 مْ، تبدأ مكوِّنة غرافيتية بالتشكُّل عند الملتقى بين الليف والحاضنة، وتكون النتيجة سلوكاً تشققياً «طريّاً» شبه لدن. وتتزايد المقاومة ومُعَامل يونغ مع ارتفاع درجة حرارة المعالجة الحرارية حتى 2750 مْ.




**الشكل 3 ـ 18: سلوك مواد الـ ك/ك المصنوعة من الفوران تجاه الكسر في حالة درجة حرارة المعالجة الحرارية القصوى.**

تؤدّي المعالجة عند درجة حرارة تساوي أو تزيد على 2800 مْ إلى تخفيض المقاومة بسبب تأذِّي الألياف حرارياً[66]. يبيّن الشكل 3 ـ 18 تمثيلاً بيانياً لتأثير درجة حرارة المعالجة الحرارية في مقاومة

الثني في المواد القائمة على الفوران. يمكن إيضاح السلوك اللّدائني للمواد المركَّبة المغرفتة من خلال طاقة التكسُّر[67]. فعند درجة حرارة للمعالجة الحرارية تساوي 1000 مْ، تساوي تلك الطاقة 0.3 كيلو جول/ م$^2$، في حين أنها أصبحت نحو 4 كيلو جول/ م$^2$ عند 2700مْ، أي أكبر بأكثر من عشرة أضعاف الأولى.

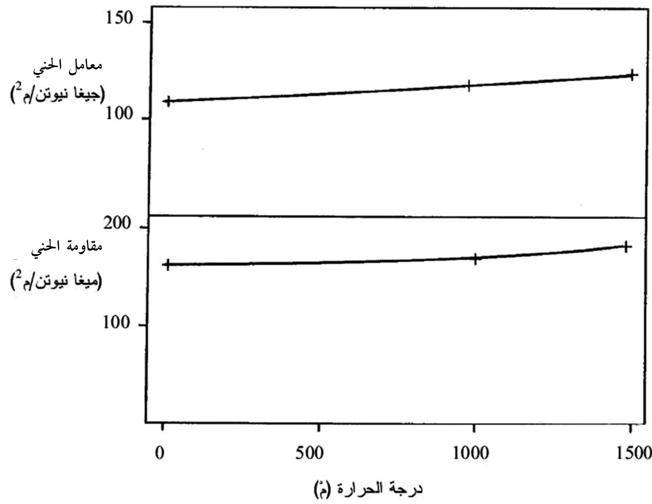
لا تتحدَّد خواص الـ ك/ ك القائم على الزفت بإنتاجية مادة الحاضنة الأولية من الكربون فقط، بل أيضاً ببنيته الميكرويّة. يعطي الزفت المكربن تحت ضغط منخفض نسبياً كربون حاضنة جيد القابلية للغرفتة، مع بنية غمدية موازية لسطح الليف، ولذا تكون خواص الحاضنة لامتناحية.

## الخواص الميكانيكية عند درجات حرارة عالية

من المزايا الرئيسة لمواد الـ ك/ ك احتفاظها بخواصها الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية، وفق ما يبيّنه الشكل 3 ـ 19[69][70]. يتضح من الشكل أنه حتى 1500 مْ، ثمة زيادة بمقدار 10 ـ 20 في المئة في كل من مقاومة ومعامل الثني مقارنة بقيمتيهما عند درجة حرارة الجو المحيط.

## خواص التعب

لا يوجد في المنشورات المفتوحة إلا القليل عن أداء الـ ك/ ك من حيث التعب. وقد بيَّن فيتزر (Fitzer) وهايم[71] (Heym) أن عمر تلك المواد يساوي $10^7$ عملية حني عند إجهاد مقداره 40 في المئة من مقاومة الحني السكونية. وتُري دراسات أخرى (مخططات وُيلر (Woeler Diagrams)) قام بها شنك[72] (Schunk) أن خواص تحمل التعب في الـ ك/ ك تبدو لذلك رائعة.




**الشكل 3 ـ 19: تغير معامل ومقاومة الحني في مواد الـ ك/ك المصنوعة من مادة أولية حرارية التصليد مع تغير درجة الحرارة(69).**

هناك سؤال يطرح نفسه ما إذا كانت آلية فتح وإغلاق المسامات، التي يجب أن تحصل في أثناء التحميل المتعب، سوف تستمر إلى الأبد. إن حجم المسام يزداد في أثناء الإجهاد الطويل الأمد، وثمة احتمال لتجاوزه، في أماكن موضعية، مقاومة الحاضنة للكسر. وتكون النتيجة تكسُّر الحاضنة في تلك المواضع وتطايرها على شكل غبار ينطلق منها. تسمّى هذه الظاهرة، كما هو واضح، الاهتراء بالتغبُّر (Dusting-out). لقد لوحظ الاهتراء بالتغبُّر عند درجة حرارة عالية (نحو 1400 مْ) في عمليات تحميل بالطرد المركزي (شفرات مروحة). لذا ثمة قيود قاسية على استخدام الـ ك/ك في التطبيقات المديدة الأجل تحت إجهادات شديدة متناوبة.

### متانة الـ ك/ك إزاء الكسر

يجب تقييم مواد الـ ك/ك، التي تحتوي على عيوب أو فراغات

داخلية نتيجة سيرورات التصنيع، من حيث متانتها تجاه التكسّر قبل النظر إلى استخدامها في تطبيق معيّن. تُعرَّف المتانة بمقدرة المادة على مقاومة انتشار الصدوع من الفراغات الموجودة. لم يُعلن حتى الآن إلا القليل من المعلومات عن متانة الـ ك/ك تجاه التكسُّر، وذلك نظراً إلى صعوبة إجراء قياسات دقيقة وذات مغزى من حيث المبدأ.

لقد وُجد أن الموسِطات المختلفة للمتانة تجاه التكسُّر تعتمد كثيراً على نوع ليف الكربون المستخدم، وعلى اتجاه الصدوع الأولية بالنسبة إلى بنية التقوية بالألياف. في المواد المركَّبة الثنائية الأبعاد المقوّاة بالقماش، رُصدت صدوع وترقُّقات شديدة عندما كان اتجاه انتشار الصدوع متعامداً مع محاور الألياف. وقد حُسِبت قيم معامل تركيز الإجهادات الحدّي (Coefficient of Stress Concentration $K_{1c}$) تساوي نحو 7.6 ميغا نيوتن م$^{3\backslash 2}$ وفق هذا الاتجاه[74][58]. إلا أن هذه النتائج ليست صحيحة لأن ميكانيك الصدع متسامتاً مع الصدع الأصلي، على غرار ما يحصل بين طبقات مادة ثنائية الأبعاد، فإنه يمكن قياس موسِطات المتانة تجاه التكسُّر. والصفائح الوحيدة البعد والثنائية الأبعاد، على وجه الخصوص، عرضة لهذا النمط من التكسُّر. وقد وُجِد أن المتانة تجاه التكسُّر في ما بين الصفائح في مادة مشتقة من الفينوليك هي من رتبة 0.11 كيلو جول/م$^2$. وهذه القيمة منخفضة جداً، وتساوي نحو نصف تلك التي قيست حتى في أكثر مواد الإيبوكسي هشاشة[58]. إن الطبيعة الشديدة الهشاشة للحاضنة، ووجود الفراغات وصدوع التقلّص، يمكن أن تؤدّي إلى تلف المكوِّنات في أثناء المعالجة. ويمكن للصدوع والعيوب الأخرى، التي تتكوَّن في أثناء دورة التفكيك الكيميائي حرارياً الأولى، أن تنمو نتيجة التحميل الحراري في الدورات اللاحقة، جاعلةً التوقّع بخواص المادة غير ممكن. لذا يمكن للمادة الثنائية الأبعاد أن تتلف بالترقّق من دون إنذار في أثناء المعالجة.

## الخواص الحرارية

إن أكثر خواص مواد الـ ك/ك أهمية بعد الخواص الميكانيكية هما النقل والتمدّد الحراريان. ولا يزيد عدد المقالات عن هاتين الخاصيتين على عدد المقالات عن الخواص الميكانيكية.

تمثِّل مواد الـ ك/ك فرصة لتفصيل الخواص الفيزيائية الحرارية في مواد الكربون وفق الحاجة. ويمكن تقدير العدد الكبير للخيارات المتاحة من خلال نظرة مختصرة إلى التراكيب الممكنة لليف والحاضنة وطريقة المعالجة:

1 ـ الليف: رايون، البولي أكريلونيتريل، زفت طور وسطي متناح (إضافة إلى اختلافات في المعالجة الحرارية).

2 ـ الحاضنة: تفكيك كيميائي حراري لمواد حرارية التصليد، توضيع كيميائي للأبخرة، تفكيك كيميائي حراري لزفت ومواد حرارية التلدُّن.

3 ـ بنيان الليف: ملبَّد، وحيد الاتجاه، قماشي، ثلاثي الأبعاد.

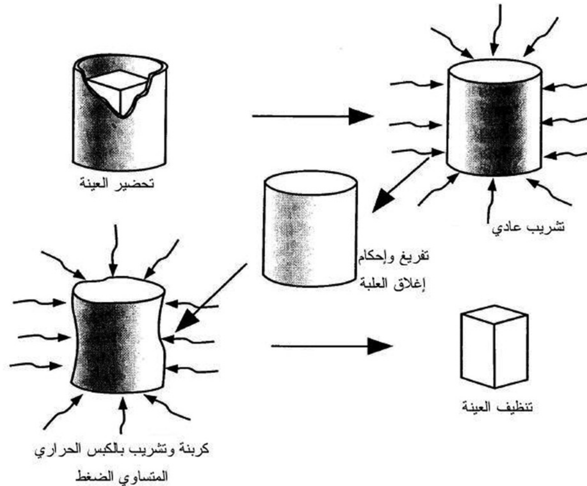
بوجود هذا الطيف من الخيارات، ثمة طيف واسع جداً من إمكانات الناقلية الحرارية الممكنة.

ثمة طيف من بُنى الكربون الميكرويّة المختلفة الممكنة التحقيق بسيرورة توضيع الأبخرة كيميائياً، ولكل منها تأثير كبير في الخواص الحرارية الميكانيكية للمادة المركَّبة. وقد قام ليبرمان (Liebermann) وبيرسون (Pierson)، لدى مخابر سانديا الأميركية (Sandia Laboratories)، باستقصاءات متعدّدة للعلاقات في ما بين السيرورة والخواص في توضيع الأبخرة كيميائياً لمواد ك/ك مختلفة[75].

**الجدول 3 ـ 8**: العلاقات بين البنية الميكرويّة للحاضنة المشكَّلة بتوضيع الأبخرة كيميائياً والناقلية الحرارية[58].

| البنية الميكرويّة للحاضنة | حجم البُلَيْرة (أنغستروم) | الناقلية الحرارية عند 350 مْ (واط/م كْ) |
|---|---|---|
| صفائح ناعمة | 125 | 25 |
| صفائح خشنة | 385 | 96 |
| متناحية | 90 | 25 |

إن العلاقة بين البنية الميكرويّة للحاضنة والخواص الفيزيائية الحرارية هي علاقة خطية نسبياً، وفقاً لما هو مبيّن في الجدول 3 ـ 8. من الواضح أن البنية الصفائحية الخشنة أشد قابلية للغرفتة بكثير من تلك الخشنة والمتناحية، ولذا تُبدي ناقلية حرارية أكبر. ثمة عدد من الدراسات الأخرى التي تتوافق مع نظريات ليبرمان الخاصة بالعلاقات بين البنية الميكرويّة للحاضنة المشكَّلة بتوضيع الأبخرة كيميائياً والناقلية الحرارية.




**الشكل 3 ـ 20: مخطط توضيحي لسيرورة الكربنة والتشريب بالكبس الحراري المتساوي الضغط**

تُعالج المواد ذات الحاضنة والألياف الكربونيتين، المشتقتين من الزفت، عموماً بتقنية الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط (HIPIC) (انظر الشكل 3 ـ 20) للزفت في خامة جافة أولية من ألياف الكربون. ثمة حاجة إلى دورات متكررة من هذه السيرورة للوصول بالحاضنة إلى كثافة عالية ومسامية قليلة مقبولتين للاستخدام في بيئات الحتّ الحراري الشديد. وقد نُشرت مجموعتان من بيانات الناقلية الحرارية الخاصة بمواد ثلاثية الأبعاد عولجت بتقنية الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط.

وصنع العاملون لدى معهد Battelle[76]، (وهم مبتكرو سيرورة الكبس الحار المتساوي الضغط (Hot Isostatic Pressing) (HIP))، نسيجاً ثلاثي الأبعاد من ليف T-50 بتوزع 2 ـ 2 ـ 6 ليف في المحاور س ـ ع ـ ص، واستخدموا أربع دورات كربنة وتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط مع قطران فحم مشرّب بالزفت لصنع مادة مركَّبة كثافتها 1.9 غ/سم$^3$. أما المادة المركَّبة الثلاثية الأبعاد الأخرى فهي مستمثلة للشدّ الحلقي: خامة أولية ذات 9 ـ 2 ـ 9 ليفا في المحاور س ـ ص ـ ع تقوم على ليف T-50 PAN، جرت معالجتها بتقنية الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط حتى كثافة 1.9 غ/سم$^3$. يتضمن الجدول 3 ـ 9 بيانات الناقلية الحرارية لهاتين المادتين.

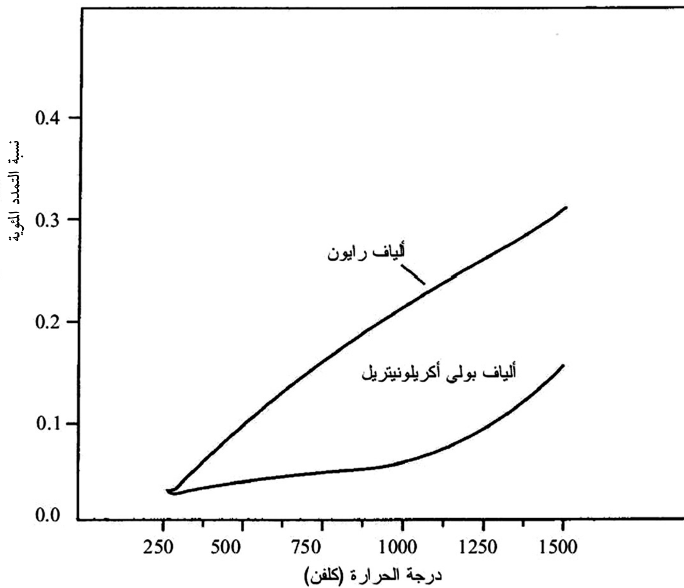
**الجدول 3 ـ 9**: الناقلية الحرارية لمادة ك/ك ثلاثية الأبعاد معالجة بتقنية الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط

| الناقلية الحرارية (واط/ م كْ) | كربون ـ كربون ثلاثي الأبعاد من المعهد Battelle | | كربون ـ كربون ثلاثي الأبعاد من Morton Thiokol | |
|---|---|---|---|---|
| | س ع | ص | س | ع |
| عند 30 مْ | 149 | 246 | 202 | 171 |
| عند 800 مْ | ـ | ـ | 91 | 80 |
| عند 1600 مْ | 44 | 60 | ـ | ـ |

إن هذه القيم أعلى من تلك التي للمواد المشتقة من الفينوليك ذات البنيان الليفي المشابه. فهي تُبدي طبيعة أشد غرافيتية وناقلية حرارية مما تبديه الحاضنة المشتقة بتقنية الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط. إلا أن الجدير بالملاحظة هو أن الناقلية الحرارية في هذه المواد لا تحقَّق إلا تحسُّناً هامشياً، في أفضل الأحوال، مقارنةً بتلك التي تبديها الغرافيتات التركيبية المعهودة، مع أن خواصها الميكانيكية أفضل كثيراً.

## الناقلية الحرارية عند درجات الحرارة العالية

ثمة عدد من التقارير المنشورة عن الناقلية الحرارية عند درجات الحرارة العالية لمواد الـ ك/ك[79][78].




**الشكل 3 ـ 21**: التمدد الحراري للـ ك/ك المصنوع بتوضيع البخار كيميائياً[78][58].

## التمدّد الحراري

يُعدُّ التمدّد الحراري خاصيةً مهمةً حين استخدام المواد عند درجات حرارة عالية. والتمدّد الحراري باتجاه محور الليف محكوم في المقام الأول بالتمدّد الحراري لليف. بعبارة أخرى، يشابه التمدّد الحراري لمادة يُستخدم فيها ليف البولي أكريلونيتريل شديد التوجيهية التمدّد في اتجاهَيْ المستوي في الغرافيت (انظر الشكل 3 ـ 21)[78][79].

## مفاعيل المعالجة في الخواص الميكانيكية

تحدّث برِّي (Perry) وآدامز (Adams) عن مفاعيل المعالجة في خواص الشدّ في نسيج ناعم، ذي مبنى 2:1:1، من الـ ك/ك الثلاثي الأبعاد المنسوج بألياف ذات مُعَامل يونغ كبير قائمة على الرايون، والمكثَّف بعدد من دورات التشريب المتعدّد بالراتنج والكربنة تحت الضغط الجوي[80]. وكانت مقاومة الشدّ ومُعَامل يونغ في الاتجاه Z بعد 13 دورة تكثيف أكبر قليلاً (192 ميغا باسكال و88 جيغا باسكال) من تلك الناتجة بعد 7 دورات (177 ميغا باسكال و84 جيغا باسكال). ويُعزى هذا السلوك إلى الفجوات التي سبّبها التمدّد حول شلل الليف في الاتجاه Z.

وبيَّنت دراسة لمفاعيل المعالجة في مادة ك/ك ثلاثية الأبعاد قام بها جيرارد[81] (Girard) أنه في كتلة منسوجة نسجاً خشناً نسبياً من الليف القائم على البولي أكريلونيتريل، أعطى التكثيف بتوضيع الأبخرة كيميائياً كثافة تساوي 1.6 ـ 1.7 غ/سم$^3$، ومقاومة شد تساوي 70 ميغا باسكال، ومُعَامل يونغ بين 50 و70 جيغا باسكال. ورفع التكثيف المختلط، باستخدام توضيع الأبخرة كيميائياً مع التشريب بالراتنج والكربنة، الكثافة من 1.8 حتى 1.9 غ/سم$^3$، ومقاومة الشدّ إلى 110 ميغا باسكال، ومُعَامل يونغ إلى 120 جيغا باسكال.

وبيَّنت دراسة أجراها ماك ألّيستر (McAllister) وتافرنا[82] (Taverna) عن مفاعيل مواد الحاضنة الأولية في كتلة قماش مثقَّبة ثلاثية الأبعاد أن التكثيف باستخدام التشريب براتنج الفينوليك تحت الضغط الجوي أعطى مقاومة ثني تساوي 90 ميغا باسكال. ورفع تكثيف مختلط من التشريب براتنج الفينوليك وتوضيع الأبخرة كيميائياً تلك القيمة إلى 109 ميغا باسكال، في حين أن التكثيف من زفت تركيبي مكوَّن من الأنثراكوينون (Anthraquinone) والأسنافثيلين (Acenaphthylene) رفعها حتى 154 ميغا باسكال.

واستقصى مولِّن (Mullen) وروي[83] (Roy) عدداً من طرائق تشكيل الحاضنة في أسطوانات ك/ك ثلاثية الأبعاد مصنوعة بطريقة الشلة المصلَّبة. وقد وجدا أن الكثافة العظمى قد تحقَّقت بتركيب من التوضيع الكيميائي للأبخرة المتجانس حرارياً والتشريب براتنج الفينوليك، في حين أن التوضيع الكيميائي للأبخرة المتدرّج الضغط أعطى أعلى مقاومتَيْ شدّ حلقي وضغط محوري (136 و115 ميغا باسكال).

وبيَّن ماك ألّيستر وتافرنا[82] مفعولاً من النوع الليفي في قماش ك/ك مثقب ثلاثي الأبعاد، حيث رفعت الاستعاضة عن الألياف القائمة على الرايون ذات مُعَامل يونغ المنخفض بالألياف القائمة على الرايون ذات معامل يونغ العالي في المستوي س ـ ع من القماش مقاومة الشدّ من 35 إلى 105 ميغا باسكال، ورفعت مُعَامل يونغ من 11 إلى 58 جيغا باسكال. وتحدَّثا أيضاً عن زيادة في مقاومة الشدّ من 80 حتى 98 ميغا باسكال حينما استُعيض، في المكوِّنة ص، عن الشلة الجافة بقضبان أولية التشكيل تحتوي على العدد نفسه من الألياف. ويُعزى هذا المفعول إلى تأذِّي الليف نتيجة غرز بشلة جافة مقارنة بالمفعول الواقي لحاضنة الراتنج حين استخدام قضبان ثابتة

المقطع. ولوحظ مفعول آخر في هذه الدراسة حينما زِيد حجم الشلة في الاتجاه ص إلى الحد الذي حصل عنده أذى عند غرز شلل أكبر عبر طبقات القماش. صحيحٌ أن مُعَامل يونغ في الاتجاه ع ازداد من 35 حتى 40 جيغا باسكال، إلا أن مقاومة الشدّ انخفضت من 80 حتى 75 ميغا باسكال.

وقارنت الدراسة ذاتها الخواص الميكانيكية في المستوى س ـ ع لمواد ثلاثية الأبعاد جرى تحضيرها من قماش مغروز ذي اتجاهات نسج متعامدة باستخدام الألياف نفسها القائمة على الرايون ذات مُعَامل يونغ العالي. وتشير النتائج إلى أنه برغم أن مقدار الألياف في القماش المغروز كان أكبر، فإن مقاومة الشدّ ومُعَامل يونغ بقيا على حالهما. فاستقامة الألياف في سيرورة النسج المتعامد، مقارنة بتلاف الألياف في المستوي س ـ ع في القماش المغروز، تساعد على استخدام أعلى كفاءة لخواص الألياف.

تُعزى المقاومات الضعيفة نسبياً إلى سيرورة التكثيف التي استخدمت كربنة وتشريباً بالراتنج والزفت تحت ضغط منخفض، فالمقارنة بالقيم الخاصة بمواد ك/ك ثلاثية الأبعاد متعامدة النسج مصنوعة من الألياف القائمة على الرايون ذات مُعَامل يونغ العالي، لكن المكثَّفة بسيرورة الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط حتى كثافة أعلى قليلاً تساوي 1.95 غ/سم$^3$، تُري مزايا المعالجة تحت ضغط عال. وتُري أيضاً أن لنسبة الليف الحجمية مفعولاً مهيمناً في خواص المادة المركَّبة. إن انخفاض قيم المقاومة ومعامل يونغ هي نتيجة لانخفاض النسبة الحجمية للألياف في نوعين من المواد الثلاثية الاتجاهات المتعامدة، والسباعية الاتجاهات. ومن الجدير بالملاحظة أنه عند زاوية ميل بمقدار 45 درجة على المستوي س ـ ع، حيث لا توجد ألياف، تكون المقاومة مساوية لتلك التي

للحاضنة ومماثلة لتلك التي للغرافيت المتوسط الجودة. وقد تم تجاوز هذا النقص في الإنشاءات الخماسية والسباعية الاتجاهات، لكن على حساب انخفاض قيم الخواص في الاتجاهين س وع.

## الحماية من الأكسدة

تجعل الخواص الفيزيائية والميكانيكية مواد الـ ك/ك مرغوباً فيها في التطبيقات التي تحتاج إلى مقاومة شدّ عالية، ووزن منخفض، ومتانة، وناقلية حرارية منخفضة، عند درجات حرارة عالية. وفي الجو الخامل، أو المخلَّى من الهواء، تتفوق مواد الـ ك/ك على غيرها من المواد في احتفاظها بخواصها. إلا أن مهندسي التصميم يواجهون مشكلة عويصة هي تأكسد تلك المواد عند درجات الحرارة المرتفعة.

يتفاعل الكربون، بجميع صيغه عموماً، مع الأُكسجين ويحترق بسرعة عند درجات حرارة تزيد على 500 مْ، وتزداد المشكلة سوءاً مع ازدياد الحرارة حتى 800 مْ، حينما يتحدَّد معدل الأكسدة فقط بمعدل انتشار الأُكسجين في الغاز المحيط بسطح الكربون[84]. في تطبيقات الاستخدام مرة واحدة، كمحرّكات الصواريخ، هذا ليس مهماً جداً. لكن في تطبيقات المواد الفضائية والعنفات الغازية، فإن ثمة حاجة إلى مدد حياة طويلة من رتبة المئة ساعة.

كان حل هذه المشكلة هدفاً لكثير من الباحثين، وما التنوع الكبير لنظم الحماية التي استُقصيت وبراءات الاختراع التي سُجِّلت لهذا الغرض إلا دليل على أنه لم يُعثر على نظام حماية ناجع حتى الآن. لكن نجاحاً لافتاً جداً تجلّى في مكوِّنات حماية حرارية عند

درجات الحرارة العالية استخدمت في مكوك الفضاء، حيث يتعرض مخروط الأنف وحواف الأجنحة الأمامية إلى درجات حرارة تصل إلى 1650 مْ.

إن جميع النقاط الآتية بحاجة إلى تمحيص دقيق حين تقييم النظم المستقبلية للحماية من الأكسدة:

1 ـ انتقال مادة الـ ك/ك من درجة حرارة المحيط إلى درجة حرارة عملها.

2 ـ بقاء المادة عند درجة الحرارة تلك مدة دقائق أو ساعات.

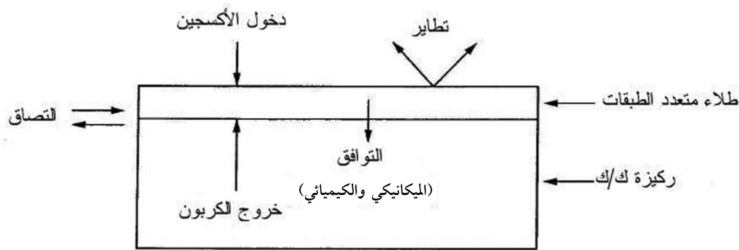
3 ـ ضرورة العمل السليم ضمن تراكيب غازية مختلفة (ساخنة أو باردة) تحتوي على بخار الماء والأكسجين وأول أُكسيد الكربون وثاني أُكسيد الكربون وملوثات أخرى تنطلق من عادم الصاروخ أو المحرّك، إضافة إلى ضرورة العمل تحت ضغوط غاز متغيرة، وعند سرعات غاز كبيرة.

4 ـ عند درجات حرارة أعلى من 1700 مْ، يبدأ كثير من المواد، المقبولة عادة بوصفها مستقرة، بالتفكك أو التعرّض للتفاعلات بين الأجسام الصلبة، وهذا ما يُفسد تماسك الطلاء.

5 ـ تأثير مقاومة الـ ك/ك (ضعفاً أو قوة) في نظام الحماية من الأكسدة.

ثمة عدد كبير من العوامل التي يجب النظر فيها بغية تطوير نظام ناجع للحماية من الأكسدة، وفق ما هو موضح في الشكل 3 ـ 22. إن الهدف الرئيس هو تطبيق طلاء يعزل المادة المركَّبة عن المحيط المؤكسد، لذا يجب أن يحتوي هذا الطلاء على مركِّبة أساسية واحدة على الأقل تعمل عائقاً فاعلاً للأُكسجين. ويجب أن يتصف عائق الأُكسجين الرئيس الأمثلي بنفوذية ضعيفة للأُكسجين، ويجب أن

تكون عيوب تغليف الكربون به قليلة أو معدومة لدرء نفاذ المؤكسدات منها. أكثر من هذا، يجب أن يتصف الطلاء بقابلية تطاير ضعيفة لدرء الحتّ المفرط ضمن تيارات الغاز العالية السرعة. ويجب أن يحقِّق مستوى جيداً من الالتصاق بالركيزة من دون تغلغل مفرط فيها. ويجب أيضاً أن تدرأ الطبقات الداخلية انتشار الكربون باتجاه الخارج لدرء الإرجاع الحراري الكربوني للأكاسيد التي في الطبقات الخارجية. أخيراً، يجب أن تكون جميع ملتقيات الطلاء الواقي والمادة متوافقة كيميائياً وميكانيكياً.




**الشكل 3 ـ 22: التمدد الحراري للـ ك/ك المصنوع بتوضيع البخار كيميائياً**(78)(58).

وحين تصميم نظم الحماية العالية الجودة لمادة إنشائية من الـ ك/ك تعمل مدة طويلة، يصبح التوافق الميكانيكي (أي درء تشظي الطلاء) المسألة التي تحتل المرتبة الأولى. تتصف المادة المركَّبة بمُعَامل تمدّد حراري أصغر كثيراً ضمن الطبقة المقوّاة بالألياف من ذاك الذي لأي مادة سيراميكية ذات بنية بلّورية متناظرة. لذا فإن جميع الطلاءات سوف تحتوي على صدوع ميكرويّة لأن الطلي يحصل عند درجات حرارة مرتفعة.

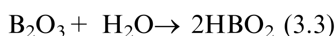
تقع عتبة أكسدة الـ ك/ك عند 370 مْ تقريباً، ويمكن تحسينها لتصبح 600 مْ باستخدام مثبّطات جُسَيْمية مقاومة حرارياً. يُعرَّف

المجال الأساسي للحماية بالطلاء بدرجة حرارة تصدّعه الميكروي وبدرجة الحرارة المحدّدة لاستعماله. وضمن هذا المجال، تكون الصدوع مغلقة ميكانيكياً بإحكام بواسطة نواتج الأكسدة. توجد العيوب دائماً في عائق الأُكسجين الرئيس بسبب عيوب التصنيع التي تنجم عن عدم توافق الطلاء مع الركيزة من ناحية التمدّد الحراري، أو نتيجة إجهادات الخدمة. وقد كان أكثر حل ناجح حتى الآن لمشكلة التصدّعات تلك هو استخدام زجاج إحكام لملء أي صدوع يمكن أن توجد في الغشاء الرئيس. ومن أجل حماية ناجحة شاملة من الأكسدة، يجب أن يكون زجاج الإحكام قادراً على العمل من نحو 600 مْ حتى درجة الحرارة التي يبدأ عندها عائق الأُكسجين الرئيس بالتصدّع ميكروياً.

### الحماية عند درجات حرارة منخفضة (تحت 1000 مْ)

تكون درجة حرارة العمل الرئيسة في كثير من تطبيقات الـ ك/ك الجوية والفضائية أعلى من 1000 مْ. ومع ذلك، على جميع مكوِّنات المادة أن تنتقل من درجات حرارة منخفضة إلى درجة حرارة العمل حين البدء بالعمل، أو الانتقال إلى درجة حرارة منخفضة حين التوقف عن العمل. يمكن تحقيق الحماية في هذا المجال من الحرارة على أفضل وجه باستخدام أغشية من الميناء (Glaze) ذات درجة حرارة انصهار أدنى، لكن حين اختيار الغشاء، يجب الأخذ في الحسبان التفاعل بينه وبين الركيزة. لقد وُجد أن عدداً كبيراً من الأكاسيد التي تشكّل أساس الزجاجيات تتصف بمفاعيل تحفيز إيجابية في معدّلات أكسدة الكربون[84]. أما المواد التي وُجد أن لها مفاعيل ـ مثبِّطة، فعددها قليل. من هذه المواد ثمة مادتان مرشحتان قائمتان على البورون (Boron) والفوسفور[85] (Phosphorus). إن قابلية أُكسيد الفوسفور للتطاير والتفاعل تتطلب مزجه مع عنصر آخر

(كالسليكا أو الألومينا) لتكوين زجاج مستقرّ، في حين أن البورون يشكّل زجاجاً أُكسيدياً مستقرّاً (درجة حرارة انصهاره تساوي 450 مْ، ودرجة حرارة غليانه تساوي 2040 مْ) بمفرده في الهواء الجاف.



$$B_2O_3 + H_2O \rightarrow 2HBO_2 \quad (3.3)$$

واختبر ماك كي (McKee) أداء غشاء أُكسيد البور بتطبيق غشاء سماكته تساوي 200 ـ 500 ميكرون على سطوح خارجية، وبتشريب مواد الـ ك/ك في الخلاء ببورات عضوية (Organo-Borates) سائلة. إن أحد العوامل المهمة في نجاح غشاء أُكسيد البور هو حركية هذا الزجاج التي تسمح بملء أي خدش في الطبقة الواقية بسرعة من خلال انسياب كتلة الزجاج.

ثمة نمط آخر للوقاية من الأكسدة هذه، سجّله مارين[86] (Marin) اختراعاً. في هذه السيرورة، يُرشّ البورون والسليكون على شكل مسحوق ناعم (0.5 ـ 2.0 ميكرون) من السليكا والبورون، أو نيتريد البورون، ضمن راتنج حراري التصليد، تُطلى به السطوح التي سوف تُحمى، ثم يُشوى. تتعرّض المُضافات في ظروف الأكسدة، إلى الأُكسجين وتتفاعل لتشكّل أكاسيد تتجمّع معاً لتكوين غشاء زجاجي.

ثمة طريقة استُخدمت في الماضي للكربون والغرافيت الجَسِيمين، هي تضمينهما مركّبات معيّنة من السليكون والبورون والزركونيوم والهافنيوم (Hafnium) في أثناء مراحل التصنيع[87][89]. في الظروف المؤكسدة، تتعرّض هذه المواد تدريجياً للأُكسجين، وتتراكم على السطح مبطِّئةً معدّل الأكسدة. لكنها ليست واقية بحد ذاتها، بل إنها تمنع عملية الأكسدة لأن جزءاً من الكربون يجب أن يُستهلك قبل بدء الطريقة بالعمل.

وفي ما بعد، طُبِّقت هذه الطريقة على مواد الـ ك/ك بإضافة

الصادّات إلى جزء الحاضنة من المادة المركَّبة[93][90]. واستُخدمت أيضاً ضمن منظومة أشمل تتضمن طلاءات خارجية متعدّدة[94].

لا يستطيع زجاج البورات (Borate) الصافي توفير وقاية رئيسة إلا مدة محدودة فوق 1100 مْ بسبب قابلية الـ $B_2O_3$ للتطاير. صحيحٌ أن هذه الطريقة محدودة التطبيقات، إلا أن العمل بها وضَّح أهمية إضافة البورون (الذي يُفضَّل أن يكون غير متأكسد لسهولة المعالجة) إلى الكربون في وضع أسس التطويرات المستقبلية.

**الحماية حتى 1800 مْ**

تقتضي درجات الحرارة التي هي أعلى، تمحيصاً شديداً في التفاعل بين الركيزة والطلاء فيزيائياً وكيميائياً وميكانيكياً. إن الطلاء يجب أن يوفّر عائقاً فاعلاً في وجه انتشار الأُكسجين نحو الداخل، وهروب الكربون نحو الخارج، ويجب أن يتصف بقابلية تطاير ضعيفة لمنع اهترائه ضمن تيارات الغاز العالية السرعة، ويجب أن يكون التصاقه الميكانيكي بالركيزة قوياً.

إن أول مشكلة رئيسة يجب الاهتمام بها هي مُعَامل التمدّد الحراري المنخفض جداً لمواد الـ ك/ك، وعلى وجه الخصوص في الاتجاه الموازي للألياف. تُعدُّ القيم التي هي من رتبة 0 حتى $1\times10^{-60}\ K^1$ مقبولة في المواد المصنوعة من الألياف ذات معامل يونغ الكبير[95]. وإذا كان في المادة المركَّبة اتجاه غير مقوى (كما في الـ ك/ك الثنائي الاتجاهات)، فإن معامل التمدّد الحراري سوف يكون $10\times10^{-60}\ K^1$ على طول هذا الاتجاه.

بناءً على اعتبارات عدّة، يُعتبر نيتريد السليكون وكربيد السليكون أكثر مادتين وعداً لتحقيق الحماية من الأكسدة، فكلاهما متوافقتان مع الكربون كيميائياً، وكلاهما يكوِّن في الجو المؤكسِد

غشاءً رقيقاً من السليكا الذي يتصف بنفوذية منخفضة للأُكسجين.

لقد أضيف عدد كبير من الطلاءات، غير الزجاج ومشكِّلات الزجاج، إلى مواد الـ ك/ك لتشغيلها في ظروف مؤكسِدة عند درجات الحرارة العالية. وقد استقصى تشون (Chown) وفريقه مواءمة طلاءات الـ SiC، المنتَجة بتوضيع الأبخرة كيميائياً والتفاعل المباشر مع السليكون المصهور[96]. واستقصى تشون[96] وفيتزر وزملاؤه[97] أيضاًعدداً من طلاءات الكربيد والبوريد الحرارية. وتشير النتائج التي حصلوا عليها إلى أن كربيد السليكون كان قادراً على توفير حماية موثوقة مدداً طويلة، على أن تبقى درجة الحرارة تحت 1700 مْ، وأن تكون العيوب قد أزيلت من الطلاء. وقد وُجد أن طلاءات الـ SiC تتفكّك بسرعة عند درجات حرارة أعلى من 1700 مْ، في حين أن طلاء مسحوق كربيد الزركونيوم وبوريد الزركونيوم (ZrC و $ZrB_2$) الملبّدة حرارياً تحقِّق حماية مؤقتة حتى درجات حرارة تصل إلى 2200 مْ.

ويبدو أن محدودية درجة الحرارة التي لوحظت في حالة الـ SiC تنطبق على جميع المواد القائمة على السليكون المستخدمة للحماية من الأكسدة. إن ثاني سليكون الموليبدن $MoSi_2$، ونيتريد السليكون $Si_3N_4$، يتّصفان أيضاً بهذه المحدودية المستوطنة في طائفة المواد السليكونية، أما المواد المقاومة حرارياً القائمة على الزركونيوم والهافنيوم، فهي قادرة على العمل عند درجات حرارة أعلى بمقدار كبير من تلك التي يعمل عندها السليكون، لكن لمدد زمنية محدودة بسبب معدّل تغلغل الأُكسجين السريع عبر تلك الأكاسيد.

وثمة طرائق كثيرة لتطبيق الطلاءات على الـ ك/ك، من قبيل توضيع الأبخرة كيميائياً، وتسريب البخار كيميائياً، وتفاعل البخار كيميائياً، والتشريب والتفكيك الكيميائي حرارياً، والتغطيس والدهان.

ومعظم الطرائق المستقصاة يقع ضمن فئات طرائق البخار الكيميائية الثلاث، وهي تشكّل عموماً أساس النظم التي تشغلها الشركات التجارية.

## توضيع الأبخرة كيميائياً

يمكن توضيع كل من نيتريد السليكون وكربيد السليكون بسهولة بطريقة توضيع الأبخرة كيميائياً. ومن الشائع جداً توضيع كربيد السليكون من ميثيل ثلاثي كلور السيلان (Methyltrichlorosilane) والهيدروجين عند درجات حرارة بين 1100 و1400 مْ وتحت ضغط منخفض بين 1 ـ 1.5 كيلو باسكال.

ويمكن أيضاً توضيع كربيد السليكون من رباعي كلور السليكون (Silicon Tetrachloride) أو من ثلاثي كلور السيلان (Trichlorosilane) والميثان.

## تسريب الأبخرة كيميائياً

هذه السيرورة هي شكل من توضيع الأبخرة كيميائياً، حيث تُعدَّل الظروف لتحقيق طلي داخلي ضمن جسم الركيزة المسامية قبل إغلاق المسامات المفتوحة برواسب خارجية. ويتحقَّق هذا عادةً باستخدام درجات حرارة وضغوط وتراكيز أقلّ من تلك المستخدمة في التغطية بالطلاءات فقط. وفي بعض الأعمال الناجحة لحماية الـ ك/ك بهذه الطريقة [98][100]، جرى ترسيب مواد مقاومة للأكسدة من قبيل نيتريد البورون، وكربيد التيتانيوم، وكربيد السليكون. صحيحٌ أن تلك الأعمال لم تكن مهتمة بالـ ك/ك بصيغته المقبولة (أي التي يمثل الكربون فيها المكوِّن الرئيس)، إلا أنه ثمة تطبيقات ممكنة لتلك الطريقة في تمتين الطبقات الخارجية للمادة المركَّبة من خلال طليها

بكربيد السليكون المتبوع بطلاء بالدهان في عملية واحدة تحقِّق رباطاً قوّياً بين الطلاء والركيزة.

وفي تطبيق مختلف لهذه الطريقة، يُستخدم تسريب كربيد البورون، متبوعاً بكربيد السليكون، على شكل غشائين رقيقين (5 ـ 1 ميكرون) مقاومين للأكسدة ضمن الألياف أو الخامة الأولية. ثم جرى تمتين المادة بالطرائق المعهودة لاستكمال تصنيعها[101].

## تفاعل الأبخرة كيميائياً

تتميز هذه الطريقة الثالثة من تفاعلات البخار الكيميائية بأن المادة المرسَّبة تتفاعل مع الركيزة لتكوين المركَّب. في هذه الحالة، يتفاعل بخار يحتوي على السليكون مع ركيزة الكربون لتكوين طبقة من كربيد السليكون.

تُجرى هذه السيرورة، بأبسط أشكالها، بتعريض جُسيْمات كربون إلى بخار سليكون في حجرة مخلاَّة من الهواء عند درجة حرارة بين 1700 و2000 مْ. وبالتحكم في طول مدة السيرورة، يمكن التحكم بسماكة الطلاء لتكوين طلاءات سماكاتها تقع بين 50 و100 ميكرون.

وثمة طريقة أخرى استُخدمت في المرحلة الأولى من معالجة مخروط أنف مكوك الفضاء ومكوّنات أجنحته الأمامية[102][103]. هنا وُضعت قطعة الـ ك/ك في وعاء يحتوي على مسحوق مكوَّن من كربيد السليكون والسليكون والألومينا، وسُخِّنت حتى 1850 ـ 1750 مْ، تحت الضغط الجوي في جو خامل، مدة 7 ـ 4 ساعات. تُنتِج هذه الطريقة طلاء سماكته 750 ـ 125 ميكرون مع عدم تغيُّر ظاهر في أبعاد القطعة المطلية. إن آلية تكوين هذا الطلاء هي تركيب من تفاعلات تولِّد في البداية مكوِّنات عالية الحرارة من خلال تفاعل متوازن واحد ضمن الوعاء، ثم تتفاعل هذه النواتج على سطح الكربون لتكوِّن كربيد السليكون.

وفي ما بعد، أدخل مصنِّعو نظام حماية مواد المكّوك المصنوعة من الـ ك/ك تعديلات على صُرر المعالجة بالتغلغل. وفي أحد التعديلات، استُبعد الألومينا من الصرّة وأضيف جزء صغير من البورون، وفي تعديلٍ آخر استعيض عن بعض كربيد السليكون بسليكون إضافي. لقد أُدخل البورون لتعزيز الخصائص الوقائية للطلاء عند درجات الحرارة المنخفضة، في حين أن السليكون الإضافي ينتِج طلاءً غنياً بالسليكون، ويُدَّعى أن هذا يخفّض مُعَامل التمدّد الحراري للطبقة ويخفّض درجة التصدّع عند التبريد.

## الحماية عند درجات تزيد على 1800مْ

تصبح خيارات المواد محدودة عند درجات الحرارة التي تزيد على 1800مْ. فالسيراميكات القائمة على السليكون تصبح غير مستقرة، وتتدنَّى خواصها. هنا تتحوَّل المعادن المقاومة حرارياً، مع بوريداتها وكربيداتها، إلى أكاسيد. وإلى جانب تلك الأكاسيد، المادتان الوحيدتان المقاومتان للأكسدة عند درجات الحرارة العالية تلك هما الإريديوم وبعض خلائط البلاتين. لذا، من أجل الحماية الطويلة الأمد في هذا المجال من درجات الحرارة، يجب الاعتماد على طبقات أكاسيد حرارية للسليكون والألمنيوم والهافنيوم والزركونيوم والإيتريوم والثوريوم والبريليوم، أو على طلاءات معدنية من الإريديوم أو خلائط البلاتين، أو على تراكيب منها.

وبعد معاينة الأكاسيد والبوريدات الحرارية والسلسيدات المختلفة (انظر الجدول 3 ـ 10)، يمكن أخذ كل هذه المعلومات وضمها معاً لتكوين نظام حماية شامل قائم على الأكاسيد ممثل في الشكل 3 ـ 23. يتألف هذا النظام من أربع طبقات: خارجية، وهي مقاومة للاهتراء، وطبقة عائقة للأُكسجين، وطبقة عائقة للتفاعل، وأخيراً طبقة عائقة لانتشار الكربون. يتضمّن الجدول 3 ـ 10 مواد

مرشّحة للاستخدام في كل من هذه الطبقات. وقد اختيرت تلك المواد اعتماداً على توافقها الكيميائي واستقرارها حرارياً فقط. ولم يُعطَ أي اهتمام لمشاكل عدم توافق التمدّد.

وتقوم وسائل حماية أخرى على منظومات من المعادن. إن معاينة الجدول الدوري للعناصر تبيّن أن ثمة 14 معدناً تزيد درجة حرارة انصهارها على 1800 مْ. إلا أن اثنين منها ملائمان للاستخدام هما الإريديوم والروثنيوم، وقد بيَّنت قياسات معدّلات التقادم في الهواء أن الإريديوم أفضل من الروثنيوم بنحو 10 مرات[106].

**الجدول 3 ـ 10**: اختيار المواد السيراميكية للحماية من الأكسدة عند درجات حرارة أعلى من 1800 مْ

| عائق الاهتراء | عائق الأُكسجين | عائق التفاعل | عائق الكربون |
|---|---|---|---|
| $Al_2O_3$ | $ZrO_2$ | ZrC | $HfB_2$ |
| $SiO_2$ | $HfO_2$ | HfC | $^aTaB_2$ |
| $Al_2O_3$ (ياقوت أزرق) | $^aTaO_2$ | TaC | $^aZrN$ |
| $ZrO_2^a$ | | TiC | $^aHfN$ |
| | | $ZrB_2$ | $^aTaN$ |

a تخميني

أكسيد حراري — حاجز حت

سليكا — حاجز أكسجين

حاجز — حاجز تفاعل

كربيد حراري — حاجز كربون

كربون (مثبّط)

**الشكل 3 ـ 23: نظام مقترح لحماية الـ ك/ك من الأكسدة عند درجات حرارة أعلى من 1800 مْ.**

تساوي درجة حرارة انصهار الإريديوم النقي 2443 مْ، إلا أنه

يشكّل مع الكربون مزيجاً أصهرياً (Eutectic)، وهذا ما يخفّض درجة حرارة انصهار المزيج حتى 2280 ـ 2250 مْ. وتخفّض إشابته بقليل من الشوائب، من قبيل 1 في المئة من الحديد وآثار ضئيلة من السليكون أو الألمنيوم أو النيكل أو الكروم، درجة انصهار المزيج حتى نحو 2110 مْ. أما الحد الأقصى للحماية بالإريديوم فهو محدود بقابلية أكاسيده ($IrO_3$, $IrO_2$, IrO) للتطاير التي تصبح مهمة قبل الوصول إلى درجة حرارة الانصهار. إن هذه المجموعة الفريدة من الخواص تجعله النظام الوحيد ذا المكوّن الواحد القادر على حماية الـ ك/ك حتى درجات حرارة تساوي 2100 مْ تقريباً. وفي ما فوق تلك الدرجة، يمكن استخدامه ضمن نظام متعدّد الطبقات حيث يمنع طلاء علوي من الزركونيا أو الهافنيا تبخّر أكاسيده القابلة للتطاير.

الأمثلة الثلاثة للتراكيب التي من هذا القبيل، التي جرى اختبار أدائها في الحماية من الأكسدة، هي Ir ـ HF وIr ـ Al و$ZrPt_3$[(107)(109)].

وقد وُجد أن النظامين القائمين على الإريديوم فاعلان في الحماية من الأكسدة فقط باستخدام تراكيب تكون فيها النسبة الذرّية للمكوِّن المشكِّل للأُكسيد الواقي أكبر من 50 في المئةذ. تحت هذه النسبة، كانت قشرة الأُكسيد مسامية، ولم يقم الأُكسيد بدور العائق الفاعل. ويمكن ترسيب كل من الإريديوم والهافنيوم بتوضيع الأبخرة كيميائياً. لكن الإريديوم استُقصي على نطاق أوسع، وجرى ترسيب طلاءات منه بالإرجاع الهيدروجيني لطَيْف من مواده الأوّلية من قبيل $IrF_6$ و$IrCl_3$ و$Ir(Acetylacetonate)_3$.

للوقاية الطويلة الأمد من الأكسدة، اقترح الباحثون منظومة مؤلفة من أربع طبقات، وما زالوا يقومون بتطويرها. تشابه هذه المنظومة كثيراً المنظومة المبيّنة في الشكل 3 ـ 24، وإنْ كانت أكثر تفصيلاً منها بقليل. يمكن أن تتألف المنظومة من طبقات أُكسيد حراري، وزجاج $SiO_2$ معدّل، وأُكسيد حراري داخلي وكربيد حراري. إن منظومة متعدّدة

الطبقات كهذه، برغم اتصافها بالاستقرار الكيميائي المطلوب، فإنها يمكن أن تؤدّي إلى مشاكل حقيقية في تكوين طبقات متجانسة الجودة. يضاف إلى ذلك أن مُعَامل التمدّد الحراري للمنظومة، مقارنة بمُعَامل تمدّد الركيزة، سوف يولّد مشاكل عويصة في التوافق الميكانيكي في حالات الصدمة الحرارية، ولا بد من حل هذه المشكلات أولاً.

إن إحدى العقبات الرئيسة في وجه الحماية الطويلة الأمد من الأكسدة، وفي وجه منظومة المواد المركَّبة القابلة لإعادة استخدامها فعلاً، هي تشظّي الطلاء الناجم عن عدم التوافق الحراري مع الركيزة في ظروف العمل المتكرر. وأكثر طريقة ملاءمة لدرء ذلك التشظّي هي الاستعاضة عن وضع الطلاء المستقل على المادة المركَّبة بمنظومة متدرّجة وظيفياً. في مثل هذا الابتكار، يمكن أن تكون ثمة منطقة هجينة بين الواقي والمادة المركَّبة تقلِّل من مفاعيل الفوارق في معاملات التمدّد الحراري.

## الاختبارات اللاإتلافية للطلاءات

ثمة دور أساسي لتقنيات الاختبارات اللاإتلافية للطلاءات في مستقبل مواد الـ ك/ك المحمية من الأكسدة. فتصنيع هذه المواد عملية عالية التكاليف بحد ذاتها. وإضافة موانع أكسدة إلى الحاضنة في أثناء التصنيع، التي يتبعها تطبيق منظومة الحماية المعقّد على سطح المادة الخارجي، تضيف تكاليف أخرى جاعلة من الضروري تحقيق أعلى درجة من قابلية تكرار إنتاج المواصفات نفسها بواسطة سيرورة التصنيع ذاتها. لذا فإنه من الضروري أن تكون ثمة تقنية موثوقة لضمان الجودة لفحص المنتَج ورفض القطع ذات الجودة المتدنية من دون هدر الأجزاء الجيدة القيِّمة. وفي هذا الاتجاه أيضاً، سوف تكون ثمة حاجة إلى نظام لتقييم حالة المكوِّنات الموجودة في الخدمة، بوصفه جزءاً من برنامج الصيانة الدورية.

**الشكل 3 ـ 24**: منظومة طلاء مستمثلة للحماية الطويلة الأمد لـ ك/ك من الأكسدة عند درجات حرارة تزيد على **1800** مْ.

ثمة عدد كبير من طرائق الاختبارات اللاإتلافية المتوفّرة حالياً، وثمة تقنيات أكثر تطوراً مستخدمة فعلاً لفحص المواد المركَّبة، لكن في ما يخص اختبارات الطلاءات، فإننا سوف ننظر هنا فقط في التقنيات التي تستطيع كشف تفكّك الصفيحات واللواصق الداخلية الخاصة بالطلاء الواقي، إضافة إلى كشف تأكسد الحاضنة. تتضمن هذه التقنيات التصوير بالأشعة السينية، والتصوير الحراري بالأشعة تحت الحمراء، والتصوير بالأمواج فوق الصوتية والتيارات التحريضية.

إن أقدم تقانات الاختبار هي التفتيش بالأشعّة السينية. توجَّه حزمة عالية الطاقة من الأشعّة السينية عبر القطعة نحو وسط تصوير (فيلم أو كاميرا أو عدّاد)، فتتشكل صورة تبعاً للتغيّرات في ناقلية المادة المركَّبة للأشعّة. تتصف مناطق الحاضنة المتأكسدة، أو تلك التي حصل فيها ترقّق صفائح، بناقلية أشدّ للأشعّة السينية، ولذا تولِّد منطقة تباين ضمن الصورة الشاملة. وفي شكل آخر من التصوير بالأشعّة السينية، تُسلَّط حزمة ضيقة على الركيزة ويُرصد الإشعاع المرتد عنها. تتناسب شدة الإشعاع المرتد مع كثافة المادة في نقطة الارتداد، ولذا يمكن استخدامها لكشف فجوات ترقّق الصفائح والأكسدة. مزية هذه الطريقة هي أن التعامل مع القطعة المختبرة ضروري من جهة واحدة فقط، وهذا ما يجعلها مثالية للفحص الدوري للأجزاء الموجودة في الخدمة[110].

وفي تطوُّر لاحق لتقنية الأشعّة السينية، استُخدم التصوير المقطعي بالأشعّة السينية. في هذه التقنية، تُمسح القطعة من زوايا مختلفة بكاميرا أشعّة سينية، وتُحلَّل الصور حاسوبياً لتوليد تمثيل ثلاثي الأبعاد للقطعة في الزمن الحقيقي. تماثل تغيّرات الصورة هنا تلك الناتجة من التصوير بالأشعّة السينية، إلا أن مواضع ترقّق الصفائح والأكسدة يمكن أن تحدَّد بدقة كبيرة. لكن هذا التصوير يجب أن يحصل من جهات عدّة، علاوةً على أنه غالٍ جداً.

أما في التصوير الحراري بالأشعّة تحت الحمراء، فيُستخدم منبع حراري عالي الطاقة، من قبيل مصباح الليزر أو الأشعّة تحت الحمراء، لإضاءة سطح القطعة، ويسجل كاشف للأشعّة تحت الحمراء صورة تولّدها تغيّرات الناقلية الحرارية ومعامل الانتشار الحراري ضمن العيّنة. تؤدّي الصفائح المترقّقة أو الفراغات إلى حصول انقطاع في مسار النقل الحراري وتسبّب تسخيناً أسرع للمادة في مقابلها. وتَنتُج عن تحليل انتشار السيالة الحرارية عبر المادة معلومات عن التوزُّع المكاني للعيوب وأحجامها وأعماقها وسماكاتها[110][111]، إلا أن ميْز هذه التقنية ينخفض مع ازدياد سماكة المادة، بسبب آلية النقل الحراري العامة فيها، ويؤدّي إلى حد أعلى للسماكة يساوي نحو 10 ملم للحصول على ميْز مقبول.

ويتصف الاختبار اللاإتلافي بالأمواج فوق الصوتية بعيب يقوم على أن ثمة حاجة عادةً إلى وسط لنقل الأمواج فوق الصوتية من منبعها إلى المادة، ولنقل الأمواج المرتدّة من المادة إلى الكاشف. وفي معظم الحالات، يتكوَّن هذا الوسط من الماء الموضوع ضمن وعاء أو المنفوث. ونظراً إلى أن مفعول الرطوبة في منظومات حماية الـ ك/ك ما زال يمثّل مشكلة، فإنه يجب تجنّب تعريض القطع المحمية إلى الماء.

ومن بين التقنيات الأخرى، فإن قياسات التيارات التحريضية هي الوحيدة ذات الاستخدام المفيد في الـ ك/ك المحمي من الأكسدة[110]. تتضمن هذه التقنية قياس تغيّرات التيارات المتحرّضة ضمن المادة بحقل مغنطيسي متناوب، تولِّده وشيعة خارجية. لذا، يجب أن تكون المادة ناقلة كهربائياً.

عملياً، توضع وشيعة في مقابل القطعة، ويُمرَّر فيها تيار جيبي ذو تردّد يمكن التحكّم فيه. ويسبب الحقل المغنطيسي المقابل

المتحرّض بالتيارات التحريضية تغيّرات في ممانعة الوشيعة. لذا تُسجَّل هذه التغيّرات بغية تحليلها. في هذه الطريقة، تُكشف كل الخواص التي تؤثّر في التيارات التحريضية (ومنها تصدّعات الطلاء وتغيّرات سماكته). ويعتمد عمق التحليل على الخصائص الكهربائية للمادة، وعلى تردّد التيار المستخدم. فكلما كان التردّد المستخدم أعلى، كان عمق الاختراق أصغر. يكون هذا التحليل فاعلاً عموماً حتى عمق يساوي 500 ميكرون تقريباً. لذا، يُعدُّ الفحص بهذه التقنية موضعي جداً، إلا أنه يمكن تكييفه ليغطي مساحات واسعة ببناء نظام ماسح. تستفيد هذه التقنية من فكرة النفاذ من جانب واحد، ولذا فهي تصلح للفحص في أثناء الخدمة والصيانة.

ويتوقع أن تكون هناك تطبيقات صغيرة للتصوير النيوتروني في فحص مواد الـ ك/ك المحمية من الأكسدة. في هذه الطريقة، تُضاء العيّنة بحزمة من النيوترونات، وتُشكَّل صورة للجزء الذي تعبره. لقد تصادف أن يكون البورون واحداً من أكفأ ماصَّات النيوترونات (ولذا يُستخدم في قضبان التحكم في المفاعلات النووية)، ولذا يمكن استخدام هذه الخاصية في مراقبة الجودة لتقييم تجانس توزعه في الـ ك/ك المحمية من الأكسدة التي تتضمن إضافات بورونية في طور الحاضنة.

## سيرورات وتقنيات تصنيع مواد الـ ك/ك

إن إحدى المسائل الأساسية في تصميم قطع مواد الـ ك/ك هي كيفية تجميع تلك القطع وربطها معاً ومع الإنشاءات المجاورة. ومن المفترض أن مواد الـ ك/ك تُستخدم عند درجات حرارة تزيد على تلك التي يمكن أن تتحملها الإنشاءات الهندسية المعدنية العملية (982 < مْ).

**الجدول 3 ـ 11**: خصائص مواد التثبيت ذات درجات الحرارة العالية المرشحة لمثبتات الـ ك/ك.

| مادة المثبت | المزايا | العيوب |
| --- | --- | --- |
| معادن مقاومة حرارياً | قوية تتوفّر لها قواعد بيانات كبيرة | تحتاج إلى طلاء<br>ثقيلة الوزن<br>عدم توافق كيميائي وميكانيكي |
| كربون/كربون | متوافقة ميكانيكياً وكيميائياً<br>خفيفة الوزن | قواعد بيانات محدودة<br>تحتاج إلى طلاء<br>مقاومة قص منخفضة |
| سيراميكات | لا تحتاج إلى طلاء<br>خفيفة الوزن<br>معامل تمدّد حراري<br>منخفض السماحيات | متانة تجاه الكسر منخفضة<br>قاعدة بيانات محدودة |

## التثبيت الميكانيكي

تُعتبر طرائق تثبيت مواد الـ ك/ك ميكانيكياً نسخاً، في كثير النواحي، عن طرائق تثبيت الإنشاءات المعدنية العالية درجة الحرارة معاً. يتضمن الجدول 3 ـ 11 لائحة المواد الرئيسة المستخدمة في مثبّتات مواد الـ ك/ك، إلى جانب مزاياها وعيوبها الرئيسة.

تتصف المثبّتات المصنوعة من الـ ك/ك عادةً بأنها بُنى ثنائية وثلاثية ورباعية الاتجاهات، أما النسج والجدل فقد استُخدما للحصول على بُنى ثلاثية ورباعية الاتجاهات، وكانت الثلاثية الأبعاد أفضلها من حيث مقاومة الشدّ. إلا أن أعلى قيمة لمقاومة القص في ما بين الصفائح في البنية الثلاثية الأبعاد كانت 41 ميغا باسكال فقط عند 1371 مْ.

## البطائن

يمكن للبطائن أن تكون مطاوعة (Compliant) أو غير مطاوعة. وأحد أنواع البطائن المطاوعة هو قماش ألومينا ـ بورو سليكات الذي يُشَرَّب بمثبّطات سائلة تحتوي على الفينوليك. يوفّر هذا النوع من البطائن بعض الحماية لجدران الثقوب، إلا أن ما هو أكثر أهمية هو

أنه يوفّر آلية «توضيع» للمثبّت ضمن سطح طلاء الـ ك/ك الخشن نسبياً. أما البطائن غير المطاوعة فقد صُنعت من $Si_3N_4$. وهي تُركَّب بالكبس، وتوفّر مساحة وقوة حمل أكبر.

إنه لمن المرغوب فيه جداً أن يكون التثبيت محكماً عند مفاصل الـ ك/ك. إلا أن السماحيات المتراكمة في العناصر الآتية تجعل ذلك مستحيلاً، أو شديد الصعوبة: طلاء الثقب، البطانة (إن وُجدت)، قطر المثبّت، والمفاعيل المتراكمة لها في الجزأين المتزاوجين.

## مثبتات الإرتاج

يتطلب تحمُّل البيئات الحركية والصوتية القاسية نوعاً من الإرتاج الشديد. والاستعانة بطريقة التثبيت بشدّ البراغي المستخدم في الوصلات المعدنية أمر صعب في وصلات الـ ك/ك. إن المثبّتات المعدنية تنزع إلى الانفكاك بسبب مفاعيل التمدّد الحراري المخرِّبة، والمثبّتات غير المعدنية لا تستطيع، بطبيعتها، تحمُّل عزم التثبيت الأولي الشديد. وبالنسبة إلى المثبّتات المعدنية الحرارية المطلية، فإن طرائق التثبيت الأخرى المستخدمة مع المثبّتات المعدنية العادية (من قبيل التعليق) غير عملية لأن الطلاء الواقي سوف يتأذّى. والتثبيت بالأسلاك ليس عملياً أيضاً لأن الأسلاك يجب أن تُطلى، ويمكن أن تتقطَّع في أثناء أي ليٍّ شديد. لذا، يبدو أن المثبّتات المصنوعة من الـ ك/ك والسيراميك التي يُطبَّق على خيوطها لاصق يتحمّل درجات حرارة عالية يمكن أن تكون وسيلة إرتاج ملائمة.

## اللأم

تبعاً لطبيعة التطبيق، يمكن أن يكون للوصلات المنفَّذة بطرائق اللأم عدد من المزايا مقارنة بطرائق الربط بالمثبّتات الميكانيكية. ومن تلك المزايا ما يأتي: (أ) يمكن لحجم ووزن القطع الملؤومة أن

يكونا أقل كثيراً؛ (ب) يتيح اللاأم استخدام تصاميم تتضمّن مكوِّنات صغيرة متراصّة متعدّدة الأجزاء؛ (ج) واستخدام مواد لَأْم عالية درجة الحرارة يسمح للمكوّنات التي تحتوي على وصلات ملؤومة العمل عند درجات حرارة تشغيل أعلى.

تمثّل التطبيقات المختلفة التي نوقشت آنفاً بإيجاز طيفاً واسعاً من درجات حرارة التشغيل. لذا جرى تطوير عدد من مواد وتقنيات اللأْم بغية تلبية متطلبات تصميم النظم وتحسين مقدرات المكوِّنات الملؤومة. ومن المواد التي استُقصيت لِلأْم الـ ك/ك والغرافيت الحشوات المعدنية القائمة على الفضة أو الذهب، وخلائط مساحيق الزركونيوم والهافنيوم وثنائي بوريد الهافنيوم وكربيد الهافنيوم. واستقصى باحثون آخرون استخدام اللأْم والربط التغلغلي لمواد الـ ك/ك بواسطة معدن التيتانيوم، والحشوات المعدنية القائمة على الفضة أو النحاس، والسليسيدات المختلفة ($MoSi_2$, $BiSi_2$, $TiSi_2$)، ومواد أخرى متخصِّصة مختلفة.

ونظراً إلى أن مواد الـ ك/ك جديدة، لم يُنشر إلا القليل من الأبحاث الخاصة بتطبيقات اللأْم الخاص بدرجات الحرارة العالية والعالية جداً. إلا أن ثمة وفرة من المعلومات عن تطبيقات المواد ذات الصلة بها. إن الغرافيتات والكربونات والسيراميكات غير الأُكسيدية والمعادن الحرارية غالباً ما تُلأَم لتلبّي احتياجات التطبيقات ذات درجات الحرارة المتوسطة حتى العالية جداً. لذا يمكن لمواد اللأْم المستخدمة في هذه التطبيقات أن تكون ملائمة للأْم مواد الـ ك/ك[112][116].

لقد كان الوصل بالطور السائل ـ الصلب (اللأْم) أكثر نجاحاً من الوصل بالطور الصلب (اللحام التغلغلي (Diffusion Welding)). يمكن اختيار مواد اللأْم لتطبيقات درجات الحرارة العالية من السيراميك والمواد الحرارية، أو من الخلائط المعدنية. تأتي مواد

اللأْم السيراميكية عادةً من الأكاسيد الزجاجية، إلا أن هذه الأكاسيد ليست ملائمة للإنشاءات الكربونية عند درجات الحرارة المرتفعة بسبب تفاعل الأُكسجين والكربون الذي يُعطي غاز أول أُكسيد الكربون. أما مواد اللأْم المأخوذة من مواد حرارية، للتطبيقات ذات درجات الحرارة العالية جداً، فهي عادة سليسيدات أو بوريدات أو كربيدات حرارية. ويمكن تكوين مواد لَأْم معدنية من معادن نبيلة، أو معادن نشطة، أو معادن حرارية، أو من تراكيب منها. ونظراً إلى «لامحدودية» الكربون المتوفّر في مواد الـ ك/ك والغرافيتات وذرّات الكربون، فإنه يمكن أيضاً استخدام خليط لَأْم أصهري مكوَّن من كربيد معدن وغرافيت عند درجات حرارة عالية جداً[113][116].

لا يتبلل الغرافيت بسهولة بمعظم الحشوات المعدنية المعهودة. لذا يجب أن تحتوي الحشوات المعدنية المستخدمة في ربط الغرافيت على مشكِّلات كربيد قوية، لأن آلية الربط تعتمد على تكوُّن الكربيد.

ويمكن صنع الحشوات المعدنية النبيلة من تراكيب من الذهب والفضة والبلاتينوم والبلَّاديوم والكوبالت والنيكل والنحاس. لا تبلل هذه المعادن الغرافيت عموماً، لكن إذا عولج الغرافيت أولاً بمعدن نشط أو حراري لتكوين كربيدات من قبيل تلك المذكورة في الجدول 3 ـ 12، أمكن لتلك الحشوات المعدنية أن تبلل سطح الغرافيت (الكربيد) وأن تكوِّن وصلة مقبولة[117]. يتضمن الجدول 3 ـ 13 لائحة بعدة حشوات لَأْم معدنية متوفّرة تجارياً يمكن أن تكون ملائمة للأَْم سطح سبق أن عولج بمعدن نشط أو حراري لتكوين الكربيدات[112][117][118]. ويمكن تكوين الحشوات المعدنية النشطة بخلط مقادير مختلفة من المعادن المشكِّلة للكربيد المذكورة في الجدول 3 ـ 12 مع الحشوات المعدنية النبيلة المذكورة في الجدول 3 ـ 13.

**الجدول 3 ـ 12**: بيانات حرارية لمعادن نشطة، ومعادن حرارية، وكربيداتها [مْ = 9\5 (فْ ـ 32)][1]

| المعدن | الكربيد | درجة حرارة الانصهار (درجة فهرنهايت) | | | | متح |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | معدن | أصهري 1 معدن+ك1 | كربيد ك2 | أصهري 2 ك2+ غ | الكربيد |
| Ti | TiC | 3035 | 3000 | 5550 | 5030 | 5.5 |
| Zr | ZrC | 3366 | 3335 | 6188 | 5270 | 4.4 |
| Hf | HfC | 4032 | 3990 | 7106 | 5760 | 5.5 |
| V | VC | 3450 | 3000 | 4890 | 4760 | 3.7 |
| Nb | NbC | 4474 | 4270 | 6330 | 5980 | 4.1 |
| Ta | TaC | 5425 | 5150 | 7015 | 6235 | 3.7 |
| Cr | $Cr_3C_2$ | 3407 | 2790 | 3440 | خ | 5.5 |
| Mo | MoC | 4730 | 3990 | 4700 | 4685 | 3.7 |
| W | WC | 6170 | 4910 | 5030 | خ | 2.9 |

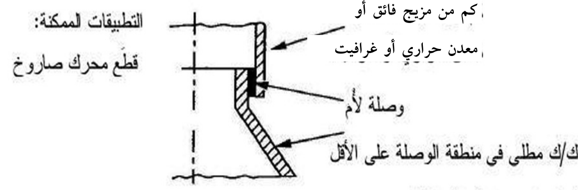
المختصرات: **ك1**: كربيد متوازن مع المعدن. **ك2**: كربيد متوازن مع الغرافيت. **متح**: مُعَامل التمدّد الحراري. غ: غرافيت. خ: تبعاً لنسبة الخليط.

يمكن إنتاج حشوات لَأْم معدنية لاستخدامها عند درجات الحرارة العالية جداً من الغرافيت وكربيدات المعادن بوضع صفيحة رقيقة من معدن مشكِّل للكربيد بين قطع غرافيت، وتسخينها حتى درجة أعلى من الدرجة الأصهرية. إن الكربيدات هشّة عموماً، وهي غير متوافقة من حيث مُعَامل التمدّد الحراري مع مواد الـ ك/ك والمواد الغرافيتية، لكن إذا خُلطت الكربيدات مع الغرافيت، فإن البنية الميكرويّة الأصهرية الناتجة يمكن أن تكون قد حسَّنت التوافق من حيث المتانة ومُعَامل التمدّد الحراري. وقد أثبت رُوسِّي (Rossi)[118][120] تحسُّن متانة البنية الميكرويّة الأصهرية في عيّنات كبيرة أصهرية من خليط من كربيد معدن وكربون، إلا أنه لوحظ أيضاً انخفاض في مقاومة الحني عندما كانت نسبة الكربون عالية في مزيجَيْ التيتانيوم والزركونيوم اللذين جرى تقييمهما. انظر الشكل 3 ـ 25.

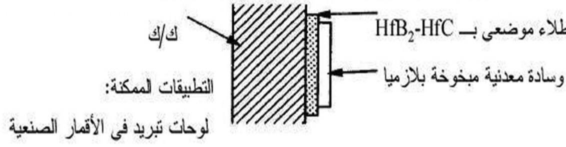
**الجدول 3 ـ 13** : حشوات خلائط معدنية نبيلة متوافرة تجارياً يمكن أن تبلل الغرافيت السابق المعالجة [مْ= 9\5 (فْ−32)][118][123] .

AWS : جمعية اللحام الأميركية American Welding Society .

| حشوة اللأْم المعدنية | درجة الحرارة (فهرنهايت) صلب | سائل | تسمية الـ AWS |
|---|---|---|---|
| Re | 5756 | 5756 | |
| Ru | 4532 | 4532 | |
| Rh | 3574 | 3574 | |
| Pt | 3216 | 3216 | |
| Pt-40Ir | 3542 | 3614 | |
| Pt-40Rh | 3515 | 3542 | |
| Pt-20Pd-5Au | 2993 | 3082 | |
| Pt-60Cu | 2192 | 2282 | |
| Pd | 2826 | 2826 | |
| Pd-70Ni | 2354 | 2408 | |
| Pd-36Ni-10Cr | 2250 | 2300 | |
| Pd-40Ni | 2260 | 2260 | |
| Pd-35Co | 2246 | 2255 | |
| Pd-82Cu | 1976 | 1994 | |
| Au | 1945 | 1945 | |
| Au-35Pd | 2601 | 2624 | |
| Au-25Pd | 2516 | 2570 | |
| Au-13Pd | 2300 | 2381 | |
| Au-34Pd-36Ni | 2075 | 2136 | |
| Au-25Pd-25-Ni | 2016 | 2050 | |
| Au-65Cu | 1814 | 1850 | BAu-3 |
| Au-62.5Cu | 1814 | 1814 | BAu-1 |
| Au-18Ni | 1742 | 1742 | BAu-4 |
| Ag-33Pd-3Mn | 2100 | 2250 | |
| Ag-20Pd | 1958 | 2120 | |
| Ag-27Pt | 1823 | 2120 | |
| Ag-27.5Cu | 1435 | 1635 | BAg-19 |
| Ni-4.5Si-3.1B | 1800 | 1900 | BNi-3 |
| Ni-4Si-2B-1Fe | 1800 | 1950 | BNi-4 |
| Ni-23Mn-7Si-4Cu | 1800 | 1850 | BNi-8 |
| Cu | 1980 | 1980 | BCu-1 |




* لوصل ملحقات مع قطع الـــ ك/ك:
1. تطلى قطعة الـــ ك/ك بمادة ملبدة بتفاعل $HfB_2$-HfC،
2. تبخ طبقة معدن بلازميا تحضيرا للخطوة التالية،
3. توصل الصفائح أو الأسلاك أو الأنابيب باللحام النقطى أو باللحام الميكروي بحزمة الإلكترونيات.




**الشكل 3 ـ 25: طريقتان مقترحتان لوصل الـ ك/ك في إطار مساعي التطوير التقانية المستمرة.**

ثمة مكوّنات جُمِّعت بطرائق اللأْم كانت قد صُمِّمت لتطبيقات محرّكات دفع الصواريخ المختلفة، ومنها وصلات صمّامات غازات حارة ووصلات بين الحاقن وحجرة الوقود الدافع. وطُوِّرت أيضاً طرائق لتجميع قطع من الـ ك/ك، وذلك لمصلحة البرنامج الأميركي (National Aerospace Plane). إضافة إلى طرائق تجميع قرميدات تدريع من الـ ك/ك والغرافيت لاستخدامها في حجرة الوعاء المخلَّى من الهواء والبلازما الكبيرة في جهاز أبحاث الاندماج في المشروع Doublet III[112][125].

واتبع خاتري (Khatri) وزملاؤه[127] نهجاً فريداً آخر للأْم مواد الـ ك/ك مع المعادن الحرارية لصنع بُنى عربات السرعات فوق الصوتية المبرَّدة بنظام تبريد. فقد طوّروا طرائق ومواد لَأْم ناجحة لمواجهة مشاكل عدم التوافق في التمدّد الحراري المتعلقة بربط مواد ك/ك ثنائية الأبعاد مع معادن مقاومة حرارياً لمجمَّعات المبادلات الحرارية العالية

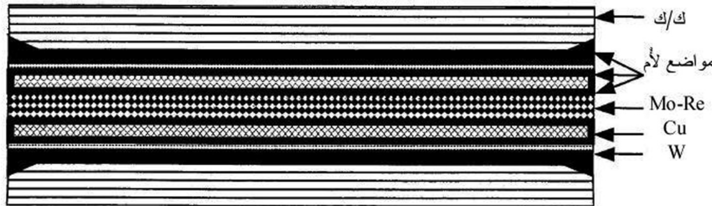
درجة الحرارة. عند التبريد من حرارة اللأْم يؤدّي عدم التوافق في التمدّد الحراري بين مادة الـ ك/ك والمعدن الحراري الملحوم معها إلى تكوين مناطق إجهاد متبقّي ضارةً في أنحاء الوصلة، فإجهادات القصّ ما بين الصفائح تؤدّي إلى تفكّك صفائح مواد الـ ك/ك. ويمكن أيضاً لإجهاد الشدّ المتبقّي في المعدن أن يقدح تشكيل صدع عرضاني. وحتى لو استثنينا تلف المادة، فإن أنماط الإجهاد المتبقّي يمكن أن تُلغي مقدرة الوصلة على تحمُّل الأحمال الحرارية الصوتية القاسية التي تظهر في عربة خدمة ذات سرعة فوق صوتية. وباستخدام نمذجة العناصر المنتهية وتجارب سيرورة متكررة، طوّروا تصميماً فريداً لوصلة متعدّدة الطبقات. تلغي طبقة طرية داخلية عدم توافق التمدّد الحراري من خلال تدفّق لدن، في حين أن طبقة داخلية أخرى شديدة الجساءة تصدّ إجهادات القص لإزالة الحمل عن الـ ك/ك الثنائي الأبعاد. وتزيد التقوية الموضعية الثنائية الأبعاد لمادة الـ ك/ك أيضاً من مقاومة الشدّ في ما بين الطبقات، ومن الناقلية الحرارية في الاتجاه ص في الـ ك/ك الثنائي الأبعاد.

ولوصل مادة ك/ك مع خليط موليبدن ـ رينيوم، طوّر خاتري وزملاؤه تقانة طبقات داخلية متعدّدة لتقليص الإجهادات المتبقّية في مادة الـ ك/ك. إضافة إلى ذلك، استخدموا سيرورة مسجلة اختراعاً لليف في الاتجاه ص لتقوية مادة ك/ك ثنائية الأبعاد، ومن الناقلية الحرارية في الاتجاه الناظمي على مستوي الليف. وكان مفعول الليف ص مضاعفاً. **أولاً**، تحسِّن ألياف الاتجاه ص مقاومة الشدّ في ما بين صفائح الـ ك/ك، وبذلك تتحسن مقاومة الشدّ في الوصلة الملؤومة. **ثانياً**، إذا استُخدمت ألياف شديدة الناقلية الحرارية في الاتجاه ص، تحسّنت أيضاً الناقلية الحرارية للمادة في ذلك الاتجاه، أي عبر السماكة، أيضاً.

النهج إلى ذلك هو تعدّد الطبقات الداخلية التي توفّر عدة مزايا.

فهي تسمح بنشوء سماكة في اللأْم، مخفّضة بذلك وصول الإجهادات إلى قيمتها القصوى. وأهم من ذلك، يمكِّن الانتقاء الصحيح لمادة الطبقات الداخلية وسماكاتها من امتصاص إجهادات القص الشديدة جداً في الطبقة الداخلية، ومن ثمَّ عزلها عن الـ ك/ك. يبيّن الشكل 3 ـ 26 الشكل الهندسي للطبقات الداخلية المستخدمة في هذه الطريقة. تقوم هذه الطريقة على تضمين وصلات اللأْم طبقة داخلية من النحاس الصافي المتوافق بغية إلغاء عدم التوافق في مُعَامل التمدّد الحراري، وطبقة تنغستين كبيرة مقاومة الشدّ لتصد إجهادات القص وإبعادها عن مادة الـ ك/ك.

وقد تم الحصول على أفضل النتائج للأْم مواد الـ ك/ك مع بعضها باستخدام مادة خاتري وزملائه[127]، أي الـ VSi، في لأْم استغرق أقل من 5 ثوان عند 1700 مْ. وصُنعت وصلات ك/ك مع Mo-Re باستخدام خلائط لَأْم نشطة من الفضة أو الذهب من الشركة (ABA) (Active Brazing Alloys)، إضافةً إلى الطبقات الداخلية المصنوعة من النحاس والتنغستين المذكورة آنفاً.




**الشكل 3 ـ 26: شكل هندسي لوصل قطع ك/ك مع الـ** Mo-Re **باللأْم.**

وبيَّنت نتائج الاختبار أن مقاومة العيّنات الملؤومة بخلائط الفضة كانت أكبر من تلك التي لُئمت بخلائط الذهب. وفي الواقع، انهار

كثير من العيّنات بسبب حصول تشقّقات في نهاياتها، لا بالقرب من الملتقى مع مادة اللأْم. وتمّ الحصول على أعلى قيم المقاومة باستخدام دبابيس Mo-Re في الاتجاه ص في لاصق مواد الـ ك/ك. أما المقاومة الضعيفة في العيّنات الملؤومة بخلائط الذهب النشطة فقد نجمت عن خصائص التبلل الضعيف لمادة الـ ك/ك بالذهب مقارنة بتبللها بالفضة. يُشار إلى أنه يمكن إزالة أي مسامات بين الطبقات الداخلية باستخدام مقادير أكبر من الحشوة المعدنية.

## حزمة الإلكترونات العالية الطاقة

أجرى غودمان (Goodman) وبيركس (Birx) ودايف[128] (Dave) سلسلة من التجارب لعرض إمكانات المسرِّعات التحريضية في تطبيقات معالجة المواد الصناعية (انظر الشكل 3 ـ 27). فقد استخدموا لوصل مواد الـ ك/ك معاً قدرة الإلكترونات العالية الطاقة على النفاذ العميق ضمن المادة لصهر طبقة لَأْم داخلية. وبيَّنت نتائجهم أن وصلات قوية باستخدام حزمة إلكترونية عالية الطاقة (High Energy Electron Beam) (HEEB) يمكن أن تربط الـ ك/ك بنفسه وبركائز معدنية عالية درجة الحرارة.

## من مزايا الحزمة الإلكترونية العالية الطاقة ما يأتي:

● سيرورة تسخين موضعي مع مصدر تسخين قابل للتحكم فيه بدقة يركِّز الطاقة وفق الرغبة في طبقة لَأْم داخلية رقيقة عالية الكثافة. ويمكّن تطبيق التسخين حيث الحاجة إلى تكوين وصلات قوية قائمة على الكربيد من دون تسخين البنية بكاملها.

● المنطقة المتأثرة بالتسخين في مادة الـ ك/ك الملؤوم بالحزمة الإلكترونية العالية الطاقة صغيرة جداً إلى حد أن إجهادات الحواف

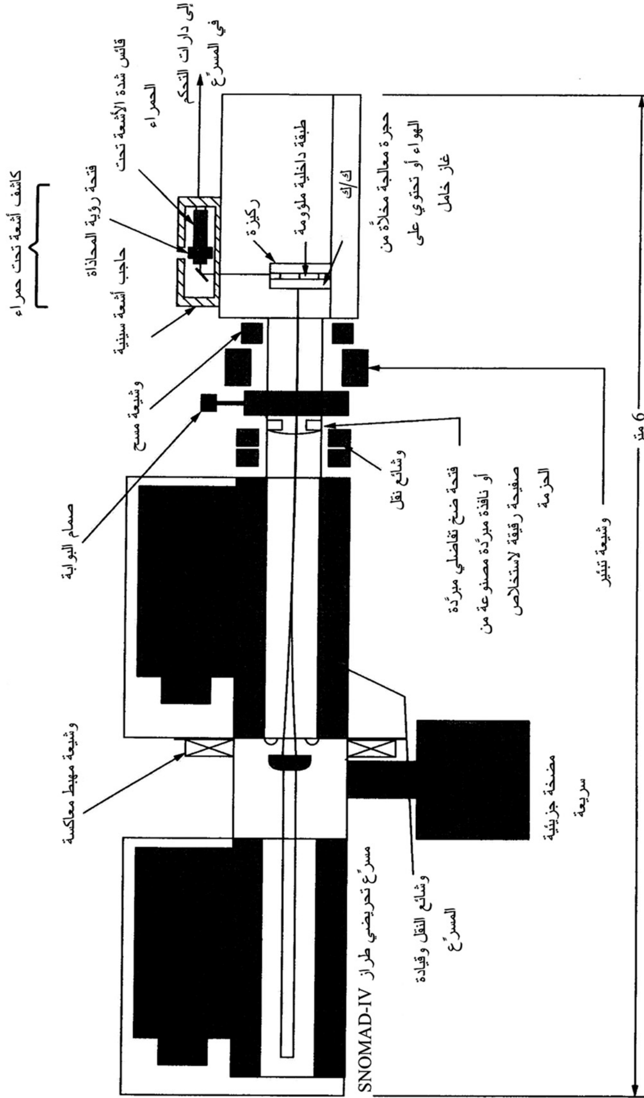
الحرارية يمكن أن ترتخي بواسطة وصلة اللأْم المطاوعة.

إن هذه السيرورة السريعة ذات الإنتاجية العالية، المتوافقة مع معالجة معادن لَأْم الـ ك/ك المختلفة ذات الأشكال الهندسية المتنوّعة القريبة من الشكل النهائي، تستخدم حزمة إلكترونية عالية الاستطاعة (50 كيلو واط ـ 1 ميغا واط) لتسخين منطقة اللأْم قبل انتقال الحرارة إلى داخل البنية. وبتغيير تبئير الحزمة أو تحريكها، يمكن تشعيع منطقة واسعة على نحو متجانس. ويحصل التسخين خلال مدة تدوم بضعة ثوان حتى دقيقة واحدة، مسخّنةً حواف وصلة الـ ك/ك، وجاعلة معدن اللأْم يسيل ويبلل الوصلة، لتكوين رابط قوي قائم على الكربيد.

وقد عرض غودمان وزملاؤه[128] لَأْم أنواع مختلفة من الـ ك/ك، ومنها ك/ك مصنوع من مادة أولية من راتنج الزفت، و ك/ك منتَج بتوضيع الأبخرة كيميائياً. وقد جُمعت هذه المواد في «ساندويشات» ك/ك، ولُئمت على ركائز معدنية تتحمّل حرارة عالية، منها خليط (Haynes 188) الفائق القائم على النيكل، وخليط الرينيوم والموليبدن بنسبة 50 في المئة. ويجري تبليل الكربون إما باستخدام عنصر كربيدي (كالتيتانيوم)، أو بطَلي سطح الـ ك/ك معدنياً. إن ترسيب طبقة (50 ميكرون تقريباً) من بخار التيتانيوم كافٍ لتحقيق تبليل متجانس.

وتبيَّن من لَأْم الـ ك/ك مع الموليبدن ـ رينيوم بوصلات وحيدة الطيَّة أن الجانب السفلي من الموليبدن ـ رينيوم قد سخن حتى درجة حرارة ثابتة، وأن السطح العلوي للـ ك/ك قد برد بالهواء الموجَّه. ومكَّن استخدام التصوير بالأشعّة تحت الحمراء من التوقّع بشكل اللأْم، وبالنسبة المئوية لمساحة اللأْم، وبالناقلية الحرارية. وعندما شُدَّت وصلة لَأْم لقياس مقاومة القصّ، اقترب شكلها كثيراً من أشكال الحواف المركزية ذات السخونة القصوى.

الشكل 3 ـ 27: تصميم نظام معالجة المواد بحزمة الإلكترونات العالية الطاقة.



وبيَّنت نتائج اختبارات القص في الوصلة الوحيدة الطَيَّة أن الوصلات المكوَّنة بالحزمة الإلكترونية العالية الطاقة أقوى من مادة الـ ك/ك، وأن الإخفاق بالقص كان دائماً بين طبقات الـ ك/ك، لا عند وصلة اللأْم. وكانت نتائج اختبار القص قريبة من تقديرات مقاومة الصفائح الداخلية في الـ ك/ك، وأعلى قليلاً من تلك المسجلة باستخدام اللأْم العادي مع مواد ك/ك مشابهة[129]. وتضمن عمل آخر للتطبيقات الفضائية، استُخدم فيه اللأْم، أنابيب معدنية حرارية للتبريد في مبادلات حرارية مصنوعة من مواد ك/ك[130].

## تطبيقات الـ ك/ك

يختلف النسيج الميكرويّ، أو البنية الميكرويّة وتكوينها، في الأنواع المختلفة من المواد المركَّبة ك/ك، تبعاً لأنواع المواد الخام المستخدمة ولظروف المعالجة. وتنشأ تعقيدات من استخدام معالَجات دقيقة من قبيل تعديل سطح الليف وتضمينه الحماية من الأكسدة. إن جميع هذه الفوارق تؤثّر كثيراً في خواص المواد.

يمكن لبنيان التقوية بألياف الكربون أن يأخذ أشكالاً متعدّدة: ألياف عشوائية قصيرة، ألياف مستمرة وحيدة الاتجاه، بُنى مجدولة، أقمشة صفائحية، نسج متعامدة ثلاثية الأبعاد (في الإحداثيات الديكارتية أو الأسطوانية)، أو بُنى متعدّدة الاتجاهات. وتُصنع ألياف الكربون التجارية من الرايون أو الأكريليك، أو من مواد أولية زفتية. وتختلف الخواص الميكانيكية والخواص الأخرى لهذه المواد كثيراً، مرةً أخرى، تبعاً للمواد الأولية ولظروف المعالجة. وتُصنَع الألياف ذات مقاومة الشدّ الكبيرة عادة من مواد أولية أكريليكية، في حين أن الزفت مفضَّل للألياف ذات مُعامل يونغ الكبير. وتُعالَج ألياف الكربون

عموماً معالَجة لاحقة لتحسين خصائص النسُج أو لتعديل التصاق الليف بالحاضنة.

ويمكن للحاضنة أن تختلف من كربون زجاجي متناح مصنوع بالتفكيك الكيميائي حرارياً لراتنج حراري التصليد، حتى كربون غرافيتي لامتناح شديد التوجيهية يَنجُم عن طور وسطي ينشأ في أثناء كربنة الزفت. ويمكن أيضاً تكوين مادة الحاضنة بطريقة توضيع الأبخرة كيميائياً للكربون الناتج من تحطيم مواد هيدروكربونية. تعتمد بنية الحاضنة الناجمة عن توضيع الأبخرة كيميائياً كثيراً على ظروف المعالجة. إن جميع خطوط الإنتاج المستخدمة لتصنيع الـ ك/ك هي سيرورات دفعات بطيئة غير كفوءة متعدّدة المراحل. لذا فإن كثيراً من المنتجات النهائية يُصنع بطرائق مختلفة. فالمواد المصنَّعة على خط تفكيك كيميائي حرارياً لراتنج حراري التصليد، مثلاً، غالباً ما تُكثَّف باستخدام توضيع الأبخرة كيميائياً، أو مزيج من زفت وراتنج مختلف عن ذاك المُستخدم في الدورة الأولى.

إن عدد تراكيب الموسِطات الممكنة لمواد الـ ك/ك غير نهائي تقريباً. وهذا يوضح أهمية الأفكار المطروحة في هذا الفصل بخصوص طائفة مواد الـ ك/ك التي يمكن تفصيل خواصها لتلائم تطبيقات معيّنة (انظر الشكل 3 ـ 28).

## المكابح والقوابض

نحو 63 في المئة تقريباً من حجم الـ ك/ك المنتَج في العالم يُستخدم في نظم مكابح الطائرات. وقد أصبح من المفيد الآن استخدام مكابح الـ ك/ك في الطائرات المدنية ذات السرعات دون الصوتية. يضاف إلى ذلك أن استخدام الـ ك/ك قد تحقَّق، أو اعتُبر مسلَّماً به في المواد الأرضية من قبيل تلك المستخدمة في سيارات السباق والقطارات العالية السرعة، وحتى في الدبابات الثقيلة.

ليست مكابح الطائرات اليوم مختلفة في تصميمها عن المكابح التي ظهرت في خمسينيات القرن العشرين. أما الفارق الكبير بينها فيكمن في نوع مادة الاحتكاك المستخدمة في المكابح. ففي المكابح الأصلية، استُخدم الفولاذ مقابل بطانة سيراميك معدني. تحتوي مجموعة مكبح الطائرة المبينة في الشكل 3 ـ 29 على عدة أقراص دوّارة وأخرى ثابتة، متوضّعة بين قرصين ثابتين آخرين يُعرفان بالصفيحتين الطرفيتين. وتسمّى الأقراص مجتمعة بكُدسة المكبح. والأقراص الدوارة مثبتة على دولاب يُصنع عادةً من الألمنيوم. وتُثبت الأقراص الثابتة وصفيحتي الضغط على أنبوب عزم دوراني فولاذي. وتعلَّق الصفيحة الطرفية بأنبوب العزم بواسطة خابور أو صفيحة خلفية. ويثبّت أنبوب العزم ببرغي على علبة المكبح المصنوعة من الألمنيوم. ويحصل الكبح عندما يصل الضغط الهيدروليكي في الوقت نفسه إلى مكابس هيدروليكية عدة محمولة ضمن علبة المكبح، فتنضغط كُدسة المكبح معاً. وينتقل عزم الكبح الناتج بواسطة أنبوب العزم إلى علبة المكبح، ومنه إلى عجلات الهبوط عبر ناقل عزم.

ثمة عدد من موسِطات الأداء المهمة في تصميم مكبح طائرة، منها العزم الكبير جداً والأكسدة والاستقرار. ويُتحكَّم في هذه المتغيّرات بالتصميم الهندسي لمادة الاحتكاك وتركيبها وظروف معالجتها. إن الميزتين الرئيسيتين للـ ك/ك هما السعة الحرارية (التي تساوي 2.5 من تلك التي للفولاذ) والمقاومة العالية عند درجات الحرارة المرتفعة (التي تساوي مثلي تلك التي للفولاذ). والنتيجة هي تخفيض الوزن بمقدار 40 في المئة مقارنة بالمكابح المعدنية، ومضاعفة عمر المكابح الذي يُقاس بعدد الهبوطات لكل عملية تبديل لها. يُتوقَّع من طائرة عريضة الجسم من قبيل الـ Airbus A320 أن تُكمل 2500 هبوط لكل عملية تبديل حين تزويدها بمكابح ك/ك، مقارنة بنحو 1500 هبوط حين استخدام مكافئ معدني (انظر الجدولين 3 ـ 14 و3 ـ 15).

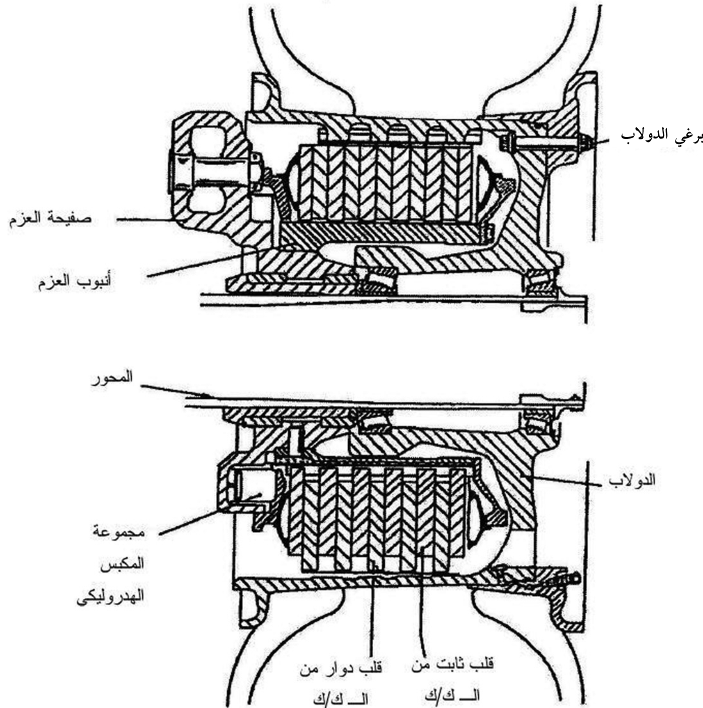
| التطبيقات | غير إنشائية | | | | | إنشائية | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | المنتجات الرئيسية الموجودة | | المنتجات التجارية الأخرى | | | تطبيقات متقدمة وبحث وتطوير | | | |
| المتطلبات | مكابح الطائرة | أنف الصاروخ حين العودة إلى الأرض | مكابح السيارات | طب حيوي | طاقة حرارية/نووية | محركات قابلة للهدر، صواريخ | محركات عنفية متعددة الدورات | مَركَبات فائقة السرعة، بنى إنشائية | حجُب حرارية للمَركَبات الفضائية |
| وزن خفيف | √ | √ | √ | √ | | √ | √ | √ | √ |
| تكلفة منخفضة | √ | | √ | √ | √ | √ | | | |
| مقاس كبير | | √ | | | √ | | | √ | √ |
| خواص الاحتكاك | √ | | √ | | | | | | |
| حت مسيطر عليه | | √ | | | | | | | |
| مقاومة و/أو جساءة كبيرة | | | | √ | | √ | √ | √ | √ |
| خواص حرارية مفصلة وفق الحاجة (مثل الناقلية العالية) | √ | √ | √ | | √ | √ | √ | √ | √ |
| مقاومة أكسدة متعددة الدورات | | | | | | | √ | √ | |

الدوافع: 1 ـ التكلفة المنخفضة هي تلك التي تقل عن 1000 دولار للباوند

2 ـ المقاس الكبير يعني مساحة أكبر من 30 قدم مربع أو طولاً أكبر من 3 أقدام

**الشكل 3 ـ 28: المتطلبات الرئيسة لتطبيقات الـ ك/ك**

ثمة ثلاثة أنواع مختلفة من مواد الـ ك/ك مستخدمة الآن في المكابح (انظر الشكل 3 ـ 30)، هي صفائح قماش الكربون، وألياف كربون مقطَّعة بشكل شبه عشوائي، ولبّادات ألياف كربون صفائحية مع تقوية عبر الطبقات. وتتألف الحاضنة كلياً من الكربون المفكّك كيميائياً حرارياً، أو من تركيب من الكربون المفكّك كيميائياً حرارياً والكربون الزجاجي. وتُصنع الحاضنة المفكّكة بسيرورة توضيع الأبخرة كيميائياً. ويُنتج الكربون الزجاجي من كربنة راتنج عالي إنتاج الفحم، وهو من الفينوليك عموماً. ويُستخدم الراتنج لرصّ ألياف الكربون على شكل قرص، أو لتكثيف قرص مسامي بتشريبها بالراتنج في المرحلة الأخيرة من المعالجة.




**الشكل 3 ـ 29: رسم توضيحي لنظام مكابح قرصية للطائرة مصنوع من الـ ك/ك**[58].

**الجدول 3 ـ 14**: مزايا مكابح الكربون مقارنة بمكابح الفولاذ[131].

| |
|---|
| **المزايا الرئيسة** |
| ● تقليص الوزن بمقدار 33 في المئة |
| ● أداء ممتاز من حيث رفض الإقلاع: |
| ـ منحنيات عزم دوراني أكثر تسطحاً |
| ـ مادة الاحتكاك لا تنصهر |
| ـ لا يوجد لحام |
| ● عمر مكبح أطول |
| ● احتفاظ بمقاومة الكربون (تخفيض احتمال رفض الإقلاع) |
| ● استقرار الأبعاد (لا يوجد انحراف أو اعوجاج) |
| **اعتبارات تصميمية إضافية** |
| ● تحكم في الحرارة |
| ـ مكوِّنات أكثر |
| ـ تعقيد أكثر (حُجُب حرارية، مواد عزل) |
| ● عوامل بيئية (مزيلات جليد عن المهبط) |
| ● سيطرة على التآكل (طلاءات واقية للدواليب) |

تجب حماية أقراص المكابح المصنوعة من مواد الـ ك/ك من الأكسدة التي تحصل بسبب الانتقال المتكرر إلى درجات حرارة عالية في أثناء الكبح. وتتحقّق الحماية من الأكسدة «بتطيين» مادة زجاجية تغلغلية لتغطية المواقع النشطة على السطوح التي لا يحصل فيها احتكاك أو بإضافة مانع أكسدة في أثناء التصنيع.

لحماية الـ ك/ك من الأكسدة تُستخدم طلاءات من قبيل $Si_3N_4$ و$SiC$. وفي إحدى طرائق الطَلي، عندما يكون الجزء الكربوني جاهزاً للمعالجة الواقية من الأكسدة، يوضع في إنبيق مطلي بالغرافيت، ويُغلَّف بمزيج من المساحيق، ويُسخَّن حتى درجة حرارة

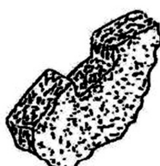
عالية. فيحوِّل التفاعل الناتج المساحيق إلى بخار يتفاعل مع الطبقة الخارجية مكوّناً الطلاء.

**الجدول 3 ـ 15**: مقارنة خصائص تصميم التحكم في الحرارة في تجهيزات الكبح لكل من الفولاذ والكربون[131]

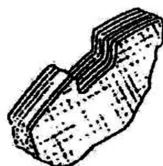
| | فولاذ | كربون |
|---|---|---|
| حُجُب الحرارة | | |
| الدولاب | × | × |
| أنبوب العزم الدوراني | غ/م | × |
| المحور | غ/م | × |
| عوازل إنشائية | | |
| عوازل المكابس | × | × |
| وسادة مشغِّل المكبس | غ/م | × |
| قاعدة أنبوب العزم الدوراني | غ/م | × |
| وسادة الصفيحة المساعدة | غ/م | × |
| ملتقى حجرة المكبس مع أنبوب العزم الدوراني | × | × |
| ملتقيات مفتاح سواقة الدولاب مع سواقة الدولاب | غ/م | × |
| تحسين التبريد بالحمل | | |
| ثقوب تهوية في أنبوب العزم الدوراني | غ/م | × |
| نوافذ علبتي الدولاب والمكبس | × | × |
| | (القاعدة) | (المضاف) |



لبّادة صفائحية



ألياف مقطّعة ذات توجُّه شبه عشوائي



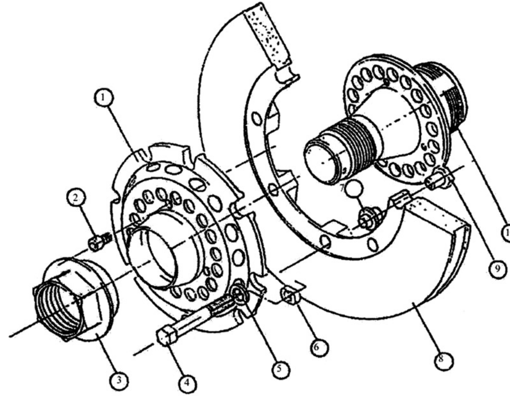
صفائح قماش كربوني

**الشكل 3 ـ 30: ثلاثة أنواع من التقوية بألياف الكربون مستخدمة في مكابح الـ ك/ك.**

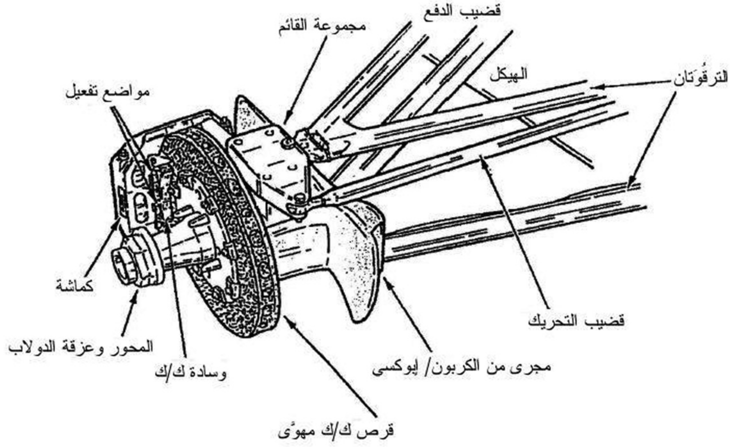
سوف تبقى مكابح الطائرات بشكلها المعروف اليوم في المستقبل المنظور، إلا أن تحسينات سوف تُدخَل في مادة الـ ك/ك وفي الإدارة الحرارية لنظام الكبح[132]. لقد استُخدمت مكابح الـ ك/ك في سباق السيارات فورمولا 1 في أوائل ثمانينيات القرن العشرين. والمكابح التي من هذا النوع تُستخدم اليوم على نطاق واسع في الرياضة. وخلافاً لمكابح الطائرات، فإن المكابح المُستخدمة في الفورمولا 1 هي من النوع ذي القرص والوسادة الذي انبثق عن المكابح المعدنية التي حل محلها. تُشغَّل المكابح بمثبّتات هيدروليكية تضغط وسادتي الـ ك/ك على القرص المهوَّى (انظر الشكل 3 ـ 31)[133] ويعتمد تشغيل المكابح على بيئة العمل والتبريد، لذا فإنه من المهم أن يكون الشكل الهندسي للقائم ومجموعة التبريد محقِّقاً للمواصفات الخاصة بمجموعة القرص (انظر الشكل 3 ـ 32). إن المتطلب الأساسي هو تأمين عبور كافٍ لهواء التبريد ضمن القوائم، حيث يوجه تيار الهواء إلى ثقوب التهوية في القرص. وعموماً، ثمة حاجة إلى مقطع عرضاني لا يقل عن 70 سم$^2$ من التدفق الهوائي لكل قرص.

المزايا الرئيسة لمواد الـ ك/ك الكابحة هي خفة الوزن والأداء الحراري الميكانيكي الممتاز والخمول الكيميائي. أما عيوبها فهي تلك المتأصّلة في جميع مواد الـ ك/ك: التكلفة والتأكسد. تُستخدم مواد الـ ك/ك الاحتكاكية في الطائرات وسيارات السباق بسبب أدائها العالي وخفة وزنها مقارنة بالمواد المعدنية. وكثافة الـ ك/ك المنخفضة، إلى جانب توجُّه تكاليفها نحو الانخفاض، يوحيان بتطبيقات ممكنة في أنواع أخرى من وسائل النقل أو الآلات. وقد اختبر الفرنسيون فعلاً تلك المكابح في قطارات المسافرين العالية السرعة (TGV Atlantique). إن الاستقرار الحراري الميكانيكي للـ ك/ك يمكِّنها من امتصاص طاقة أعلى كثيراً خلال مدة قصيرة مما تمتصّه المكابح المعدنية أو العضوية. واستخدام مكابح الـ ك/ك في

حالات الطوارئ أيضاً أمر شديد الأهمية. يمكن للمرء أن يتخيَّل أيضاً تطوير مكابح طوارئ لحالات عزم الاندفاع الكبير، بغية إيقاف القطارات والشاحنات الكبيرة على مسافات قصيرة، أو درء الأذى بسبب تعطّل علب السرعة في رافعات مداخل المناجم، على سبيل المثال. وثمة مكابح وقوابض ك/ك مستخدمة في العربات العسكرية (خصوصاً في اليابان) تحسِّن حركة الهواء، أو تسمح بتوزُّع أشدّ فاعلية لوزن العربة على الأماكن، حيث الحاجة القصوى إليه، أي عند الأجزاء المدرَّعة. لكن بالنسبة إلى العربات السياحية، فتُعتبر تكلفة الـ ك/ك عموماً عالية جداً. لقد جرى تطويرٌ ناجح إلى حد ما لمكابح عربات صغيرة استُخدمت فيها وسائد كربونية وأقراص من حديد الصبّ[134]. إلا أنه من الصعب توقُّع إدخال الـ ك/ك في مكابح وقوابض في وسائل النقل ضمن المدن، إلا إذ فُرض ذلك بتشريعات مكافحة التلوث، لأن جُسيْمات الـ ك/ك غير ضارة نسبياً مقارنةً بالأسبستوس (الأميانت) والمواد العضوية المستخدمة حالياً.




**الشكل 3 ـ 31: مخطط تفصيلي لنظام مكابح من الـ ك/ك لسيارات السباق فورمولا 1: (1) جرس القرص، (2) برغي تثبيت الجرس، (3) عزقة الدولاب المطوَّلة، (4) برغي تثبيت القرص مع جرس القرص، (5) فلكة تثبيت، (6) حلقة ذراع، (7) برغي تجميع، (8) قرص ك/ك، (9) عزقة تجميع، (10) محور.**




**الشكل 3 ـ 32: شكل المكابح ومجاري التهوية في سيارة سباق الفورمولا 1.**

في ما يخص المستقبل، من الممكن تحديد عدد من الأهداف التطويرية لتحسين أداء مواد الـ ك/ك:

1 ـ زيادة الناقلية الحرارية، خصوصاً في الاتجاه المتعامد مع سطح الاحتكاك.

2 ـ زيادة معامل الاحتكاك السكوني (Static Coefficient of Friction).

3 ـ زيادة مقدار التشوّه قبل التلف.

4 ـ تحسين المقاومة النوعية.

5 ـ تخفيض التكاليف.

لكن أحد الأسباب الرئيسة لاعتماد مكابح الكربون هو خفة الوزن. لذا فإن المصمّمين متردّدون في تحسين المقاومة بالتضحية بخفة الوزن. وأحد اعتبارات التصميم المهمة هو مقاومة المادة في

حالة «الاهتراء التام». لذا ثمة سعي إلى زيادة المقاومة النوعية. وفي الوقت نفسه، يُعتبر مقدار التصريف الحراري مهماً أيضاً، وهذا ما يتطلَّب مادة عالية الكثافة تتصف بمزية إضافية هي الناقلية الحرارية العالية. كذلك فإن استخدام ألياف مستمرة منسوجة نسجاً ثلاثي الأبعاد يمكن أن يزيد الناقلية الحرارية، إضافة إلى المقاومة النوعية والمتانة. يمكن لتحسين متانة شبكة التقوية بالألياف المستمرة أن يكون أقل حساسية للتوزُّع غير المتجانس للتحميل الحراري الميكانيكي. وزيادة مُعَامل الاحتكاك السكوني للـ ك/ك يمكن أن يزيل عزوم الدوران الشديدة غير المرغوب فيها التي تظهر في مكابح الطائرات في أثناء سير الطائرة على أرض المطار، أو في مكابح سيارات السباق عندما تكون «باردة». إلا أن من الصعب تخيُّل كيف يمكن تحقيق ذلك.

تشير الدلائل إلى أن تشكيلة المادة المثلى للمكابح هي نسيج قطبي ثلاثي الأبعاد مع حاضنة عالية الكثافة مشتقة من الزفت. إلا أنه من غير المحتمل عملياً استخدام مثل هذه المادة لأنها غير مجدية اقتصادياً، فهي أغلى بسبع مرات من المادة المقطعة الثنائية الأبعاد التي تُعدُّ ملائمة للمهمة، مع أنها ليست مثالية. وليس من المستبعد إدخال مثل هذه المادة في تطبيق للفورمولا 1 غير حساس للتكلفة نسبياً، حيث تخفِّف المادة التي هي بطبيعتها أكثر استقراراً من الناحية الترموديناميكية وطأة مشاكل الأكسدة، فالمكابح المستخدمة اليوم في الفورمولا 1 ليست كُفوءة نسبياً من حيث المواد والعمل، وقد تؤدّي المواد الثلاثية الأبعاد العالية الكثافة إلى الاستغناء عن تلك المكابح. يُضاف إلى ذلك أن تطوير قرص ثلاثي (قرصان ساكنان وقرص دوار) مشابه للمستخدم في مكبح الطائرة يمكن أن يخفِّض إمكان تأكسد سطح الاحتكاك، ويضمن ضغط كبح ذا توزُّع أكثر تجانساً، ويتيح

مساحة سطح احتكاك أكبر، شريطة أن تكون الناقلية الحرارية عالية بقدر كافٍ لمنع التسخين المفرط. وحينئذٍ يمكن تجميع وحدة المكبح في تشكيلة صغيرة ذات مقطع عرضاني لتحريك الهواء مقلص جداً وعطالة أقل، يتجليان في تسارع أفضل حين الخروج من المنعطفات. طبعاً، يجب أن يخضع كل من الأقراص والوسائد إلى تحسين الوقاية من الأكسدة للسطوح غير الاحتكاكية، بخاصةً ضمن ثقوب التهوية.

تستخدم معظم وسائط النقل الحديثة اليوم نظم مكابح الـ ك/ك. فمع ظهور الطائرات النفاثة الضخمة، كان على الصناعة الجوية إيجاد طرائق أفضل لإيقاف مثل تلك الأجسام سريعاً. ونتيجةَ لذلك جرى تطوير مواد مركَّبة من الكربون لنظم مكابح الأقراص تتصف بالسعة الحرارية الكبيرة والمقاومة العالية عند درجات الحرارة العالية.

والسيرورات المبتكرة لتسريب إضافات سيراميكية داخل خامة التشكيل الـ ك/ك المستخدم في قرص المكبح فاعلة في تحقيق تغلغل متجانس لتلك الإضافات عبر المقطع العرضاني للخامة. لذا فإن تقانة مواد المكبح الحرارية ملائمة لتصنيع مكابح ذات أقراص من الـ ك/ك للمواد الجوية والفضائية والآليات والشاحنات الثقيلة، ولأيٍّ تطبيقات تحتاج إلى احتكاك شديد واهتراء قليل.

يزن قابض سيارة سباق مصنوع من الـ ك/ك أقل من نصف وزن نظيره المعدني الملبّد حرارياً ذي الأداء المشابه. والوزن المنخفض يقلِّل العزم العطالي وقوة الطرد المركزي والطاقة الحركية التي يولّدها القابض، وهذا ما يجعل المحرّك السريع الدوران يستجيب بسرعة لمتطلبات السائق. كذلك فإن تعشيق القابض وفك تعشيقه السريعين والنظيفين يمكِّنان من تحريك عصا تبديل السرعة بسهولة أكبر.

صمَّم المهندسون قابضاً من الـ ك/ك يبدو من المؤكد أنه سوف يصبح شائعاً في حلبات السباق كمكابح الـ ك/ك. فهو يتصف بعمر أطول على نحو ملحوظ من عمر القوابض العادية، إضافة إلى أنه خالٍ أساساً من مشكلة التلف في أثناء السباق. إن هذه التحسينات في عمر القابض ووثوقيته يمكن أن تكون مزية مهمة في المنافسة. فإمكاناته الخاصة توحي بأنه قد تكون ثمة تطبيقات أخرى، غير تطبيقات السباق، لقابض الـ ك/ك أيضاً.

وربما تكون مقاومة قابض الـ ك/ك للاهتراء الخاصية الوحيدة ذات الأهمية الكبرى. ففي تطبيقات سباق المحترفين الكبرى، يعمل القابض العادي مدة دورتي تحمية وسباق واحد، ثم يُبدَّل. بالمقارنة، تدوم قوابض الـ ك/ك خمسة سباقات أو أكثر. لقد عمل قابض ك/ك مسافة 2000 ميل، وهذه مسافة تكافئ نحو 7 حتى 10 سباقات (وهذا شيء لافت في بيئة يُعاد فيها تعمير المحرّك بعد بضع مئات من الأميال!).

لكن قوابض الـ ك/ك الحالية أغلى كثيراً من القوابض المعدنية، وهي تستحق قيمتها إذا كان الأداء هو المطلوب. ففي سيارة سباق التصادم للمحترفين، تُستخدم سطوح قابض من الـ ك/ك لنقل عزم دوران محرّكها الذي تبلغ استطاعته 2500 حصان. وتُستخدم أيضاً مكابح ك/ك لإيقاف السيارة فوراً من سرعات تصل إلى 300 ميل في الساعة. بهذا الفعل، تمتص المكابح طاقة بمعدل 000 000 3 قدم ليبرة في الثانية (نحو 4060 كيلو واط)، وتصل حرارة مادة الـ ك/ك إلى درجات تتجاوز 1371 مْ.

يُتوقع أن تصبح قوابض الـ ك/ك شائعة حيث تكون ثمة حاجة إلى أفضل أداء: في سباق السيارات (ومن ضمنها سباق التصادم وسباق المسافات القصيرة). ومن المحتمل أيضاً ظهورها في الآليات

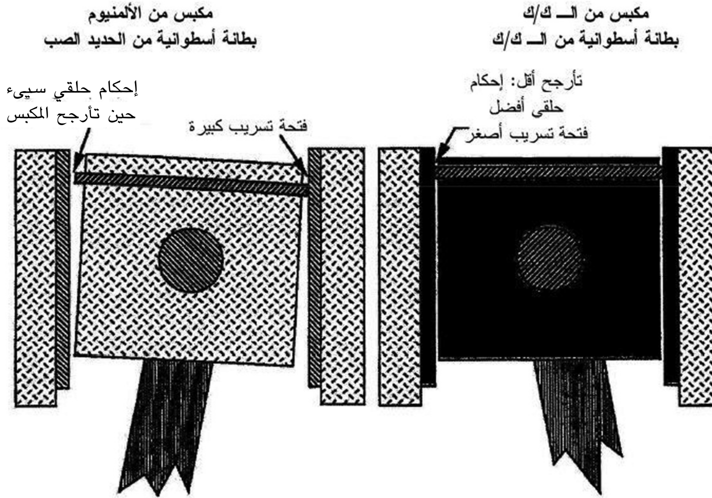
الكبيرة الكثيرة الاستخدام، ومنها الشاحنات الثقيلة وتجهيزات إنشاء الطرق. هنا يمكن أن تكون تكلفة القابض الإضافية قليلة جداً لأن مدة التوقف عن العمل تصبح أقصر بسبب معدل الاهتراء المنخفض. ومن التطبيقات الممكنة الأخرى، التجهيزات التي تصعب خدمتها وصيانتها بسبب عدم إمكان الوصول إلى الجزء التالف منها (كما في آلات المناجم)، أو التي تعمل في بيئات قاسية (كسوّاقات قضبان التحكم في المفاعلات النووية أو آلات المعالجة الكيميائية).

### المكابس

كانت مكابس محرّكات الاحتراق الداخلي تُصنّع من مواد من قبيل حديد الصب أو الفولاذ أو الألمنيوم. ومعظم المكابس التي تصنع اليوم هي من الألمنيوم. إلا أن الألمنيوم يتصف بمقاومة وجساءة منخفضتين عند درجات الحرارة العالية، وبمُعَامل تمدّد حراري عالٍ. لذا جرى تطوير مفهوم مكبس جديد، يُصنع من مادة ك/ك مقاومة حرارياً، بعد تجنّب عدد من مثالب مكابس الألمنيوم. إن مادة الـ ك/ك التي طوِّرت في أوائل ستينيات القرن العشرين أخفّ وزناً من الألمنيوم، وذات مقاومة وجساءة أشدّ من تلك التي للألمنيوم، وتحتفظ بهذه الخواص عند درجات حرارة أعلى من 1371 مْ. يضاف إلى ذلك أن مُعَامل التمدّد الحراري المنخفض والناقلية العالية للحرارة يعطيان مادة الـ ك/ك مقاومة ممتازة للصدمة الحرارية. ثمة مبادرة تسمّى برنامج مكبس الـ ك/ك المتقدم (Advanced C/C Piston Program) أُطلقت في عام 1986 لتطوير واختبار مكابس من الـ ك/ك لاستخدامها في محرّكات ثنائية أو رباعية الأشواط. وقد صُمّمت مكابس الـ ك/ك في هذا البرنامج لتكون بديلاً لمكابس الألمنيوم، وتُستخدم فيها مجموعات تثبيت للمكبس ومجموعة حلقات إحكام معتَمدة في الصناعة. وقد بيّنت

الاختبارات أن المكبس المصنوع من مادة ك/ك يمكن أن يعمل بنجاح في المحرّكات الثنائية أو الرباعية الأشواط[135].

ويمكن لمكابس الـ ك/ك أن تجعل المحرّكات أعلى وثوقية، وأكثر كفاءة (انبعاثات هيدروكربونية أقل وكفاءة وقود أعلى)، وذات استطاعة خرج أكبر. وباستخدام خصائص مادة الـ ك/ك الفريدة، وهي معدّل التمدّد المنخفض، والوزن المنخفض، والمقاومة والجساءة العاليتان عند درجات الحرارة المرتفعة، وناقلية الحرارة العالية، يمكن لمكبس الـ ك/ك **(1)** أن يمتلك مقاومة أكبر للتلف البنيوي الناجم عن فرط التسخين، وأن يحقِّق احتراقاً أفضل بنسبة وقود/ هواء أصغر، **(2)** وأن يُصمَّم ليكون أخفّ وزناً من مكبس الألمنيوم، وهذا يخفّض الكتلة ذات الحركة الترددية في المحرّك، **(3)** وأن يُشغَّل في بيئة حرارة احتراق أعلى من دون تلف.




**الشكل 3 ـ 33: فكرة مكبس وقميص من الـ ك/ك.**

يتطلب أحدث شكل شائع لنظام المكبس، وهو مبيّن في يسار الشكل 3 ـ 33، خلوصات كبيرة نسبياً بسبب التمدّد الحراري والتشوهات الناجمة عن التدرّج الحراري في المحرّك. ويؤدّي الخلوص الكبير إلى وجود فتحة يتسرَّب منها مزيج الوقود والهواء الذي ينجو عندئذٍ من الاحتراق، ويُطرح على شكل هيدروكربون غير محترق. ويجعل الخلوص الكبير أيضاً المكبس يتأرجح في أثناء حركته التردّدية ضمن الأسطوانة، خصوصاً في أثناء إقلاع المحرّك وهو بارد، وهذا ما يؤدّي إلى تدنّي أداء حلقات الإحكام. ويمكن لتأرجح المكبس في أثناء الإقلاع البارد أيضاً أن يولِّد ضجيجاً غير مرغوب فيه. وإذا حل مكبس الـ ك/ك محل مكبس الألمنيوم ضمن قميص مصنوع من حديد الصب، تغيَّر الخلوص مع تغيّر الحرارة بطريقة معاكسة لتلك التي تحصل بوجود مكبس الألمنيوم، لأن مكبس الـ ك/ك لا يتمدّد، في حين أن القميص يتمدّد. وهذا يقتضي جعل الخلوصات أصغرية عند الإقلاع البارد، لا عند درجة حرارة العمل، هذا يعني أن الخلوصات عند درجة حرارة العمل تفرضها درجات الحرارة الدنيا التي يتوقع أن يواجهها المحرّك، وهذا قيد غير مرغوب فيه أيضاً. إن النظام المبيّن في يمين الشكل 3 ـ 33 يدرأ هذه المشكلة. هنا يمكن إعطاء الخلوص بين المكبس والأسطوانة أصغر قيمة يسمح بها تأثير التشوّهات الحرارية للكتلة المحيطة بقميص الـ ك/ك. لذا ينخفض حجم الفتحة وتأرجح المكبس على كامل مجال حرارة التشغيل. لاحظ أيضاً أن حلقة الإحكام حول مكبس الـ ك/ك قد أزيحت لتكون أقرب إلى أعلى المكبس، وهذا يُقلِّص أيضاً حجم الفتحة المسرِّبة. أما تقريب موقع الحلقة من أعلى المكبس فهو ممكن لأن مكبس الـ ك/ك يحتفظ بمقاومته وجساءته مع ارتفاع درجة الحرارة.

وبيَّن التطوير والاختبار، اللذان حصلا في إطار برنامج المكبس المتقدم[135]، أنه يمكن صنع مكابس من مواد ك/ك حرارية، وأن مكبس

الـ ك/ك يمكن أن يُشغَّل بنجاح ضمن محرّك احتراق داخلي. وقد جرى تشغيل ثمانية مكابس بنجاح في نوعين من المحرّكات: خمسة مكابس في محرّك ثنائي الأشواط، وثلاثة مكابس في محرّك رباعي الأشواط.

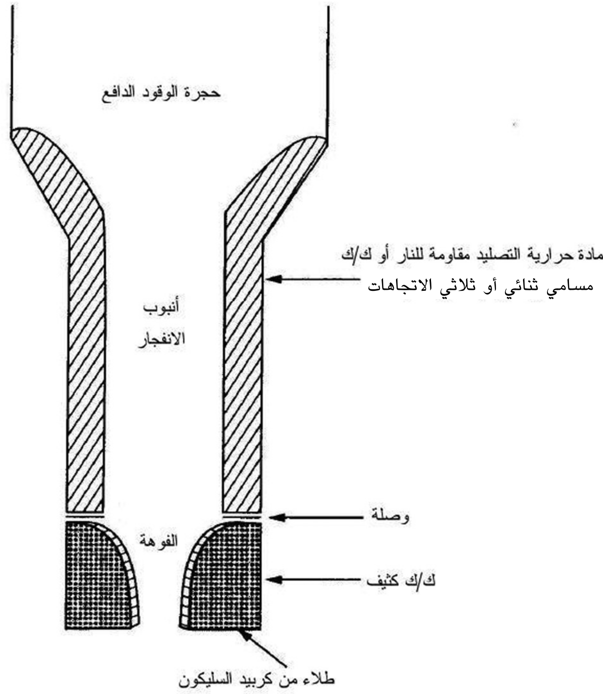
ويمكن تصميم مكابس الـ ك/ك لتحل محل مكابس الألمنيوم الموجودة مع استخدام حلقات الإحكام ومجموعات تثبيت المكبس المعتَمدة في الصناعة. وباستغلال جميع الخواص الفيزيائية لمواد الـ ك/ك الحرارية، يمكن تخفيف وزن المكبس لتقليص الكتلة ذات الحركة الترددية في المحرّك. ويمكن صنع المكابس بحيث تمتلك وثوقية إنشائية أفضل حين استخدامها في ظروف التشغيل نفسها التي تُستخدم فيها مكابس الألمنيوم. ويمكن صنع المكابس بحيث يكون الخلوص بين المكبس وجدار الأسطوانة صغيراً.

ويمكن لمكابس الـ ك/ك أن تجعل المحرّكات الثقيلة أعلى كفاءة ووثوقية، وذات قدرة خرج أكبر. فالمحرّك المزوَّد بمكابس ك/ك يمكن أن يعمل باستخدام مزيج وقود وهواء ذي نسبة وقود أصغر، لأن هذه المكابس تستطيع العمل في بيئات احتراق مرتفعة الحرارة من دون أن تتلف. والمحرّك الذي يعمل بمزيج وقوده أقل يمكن أن يُعطي قدرة أكبر، وأن يُصدر هيدروكربونات أقل في الدخان، وأن يحقّق كفاءة وقود أعلى. أكثر من هذا، ونظراً إلى أن مادة الـ ك/ك تحتفظ بمقاومتها وجساءتها عند درجات الحرارة العالية، فإن مكابس الـ ك/ك تمتلك مقاومة أعلى للتلف البنيوي الناجم عن فرط التسخين، وعن انخفاض نسبة الوقود في المزيج، وعن ضغوط الأسطوانة العالية التي تنجم عن الانفجار.

تتألف مكابس الـ ك/ك المصنوعة لأغراض تجارية من حاضنة كربونية مقواة بألياف الكربون، وتُعالج المادة بسيرورة توضيع البخار كيميائياً التي تُعطي خواص أفضل مقارنةً بما تعطيه طرائق التكثيف الأخرى.

## محرّكات الصواريخ

محرّك الصاروخ من حيث الجوهر هو نظام ري (Venturi)، أي إنه نظام يتألف من جزء متقارب موضوع ضمن المحرّك، إضافة إلى حلق ومخروط خروج (الجزء المتباعد). تمر غازات العادم الواردة من حجرة الوقود الدافع عبر الحلق ومن ثَمَّ تخرج من الفوهة. وسطيّاً، يشتعل محرّك الصاروخ نحو 30 ثانية. لذا فإن المتطلبات من مواد بناء الصاروخ هي العمر القصير، مع القوة الكبيرة جداً. وتعتمد مقاسات مكوِّنات المحرّك على حمل الصاروخ. يبيّن الشكل 3 ـ 34 رسماً توضيحياً لمحرّك صاروخ.




**الشكل 3 ـ 34: مخطط توضيحي لبنية محرك صاروخي شائعة.**

استُخدمت مادة ك/ك ثلاثية أبعاد متعامدة في صنع حلق لمحرّك صاروخ ذي نصف قطر صغير (حتى بضع عشرات من الميليمترات) طوال عدد من السنين. أما المكوّنات التي هي أكبر، فقد كان من الضروري صنعها من مادة قطبية منسوجة، مُشغَّلة من أسطوانات أو أشكال منحنية. وقد جرى اختبار مكوّنات من هذا النوع في الولايات المتحدة وفرنسا. ونجم عن البحث والتطوير المستمرين تقليص متتالٍ في عدد أجزاء المحرّك إلى حد أن كامل المدخل والحلق أصبحا الآن قطعة واحدة، في حين أنهما كانا في الماضي منفصلين على شكل قطع متعدّدة. إنها الآن متكاملة تكاملاً قضى على الفجوات والوصلات ونقاط الضعف الأخرى التي تمثّل مواقع الاهتراء الإجهادي. يُضاف إلى ذلك أنه لم يعُد ثمة فارق في التمدّد الحراري بينها.

إن معايير انتقاء مادة فوهة خروج الغاز أقسى من تلك الخاصة بالحلق. فالفوهة تُبنى عموماً من مادة كثيفة من الـ ك/ك يمكن طلاؤها بالسيراميك SiC عادةً، بُغية ضمان مقاومة جيدة للأكسدة والاهتراء. الجدير بالملاحظة هو أنه برغم أن مدة احتراق المحرّك قصيرة نسبياً، فإن الفوهة يجب أن تتصف باستقرار أبعاد ممتاز، وإلا فإنه لا يمكن التحكّم باتجاه الدفع تحكّماً سليماً. وغالباً ما تتجاوز درجات حرارة الفوهة الـ 2000 مْ، وتنطلق الغازات بسرعة تفوق سرعة الصوت، وهي تحتوي على وقود غير محترق مع الماء. من الواضح أن بيئة كهذه سوف تؤدّي إلى تآكل مواد الـ ك/ك غير المحمية، ولذا ثمة حاجة إلى قليل من الحماية السيراميكية. ونظراً إلى أنه لا يُعاد استخدام فوهات الصواريخ عادة، فإنها لا تحتاج بالضرورة إلى حماية من الأكسدة، ويمكن أن يُسمح باحتراقها جزئياً. طبعاً، يجب أخذ هذا الاحتراق في الحسبان في مرحلة التصميم.

يُفضَّل طبعاً الـ ك/ك الكثيف بسبب مقاومته الممتازة للحت الحراري. ثمة عدد من الشركات التي تستخدم سيرورة الكربنة والتشريب بالكبس الحراري المتساوي الضغط HIPIC لصنع مكوّنات محرّكات الصواريخ.

لقد ثبت أن الخامات الأولية المستخدمة لصنع فوهة محرّك الصاروخ، والمصنوعة بالجدل الثلاثي المحاور لألياف الغرافيت بتقنيات مؤتمتة، هي بديل قابل للتطبيق للخامات المفتولة المعهودة المستنزفة للجهد. وثمة دلائل على أن بنية الـ ك/ك توفّر مرونة تصميم بنياني ليفي فريدة باستخدام بنية ثلاثية المحاور رباعية الاتجاهات في مناطق المدخل والحلق، وتمكّن من تفصيل بنية غشائية ثلاثية المحاور في مواضع مخروط الخروج. ويشير التوصيف البنيوي الحراري الأولي إلى أن هذا النوع من المادة ملائم تماماً لاستخدامه في صنع مكوّنات محرّك الصاروخ[136].

## التحجيب الحراري (نظم الحماية الحرارية)

عندما ينطلق صاروخ إلى الفضاء بسرعة تزيد على 27 000 كم/سا، يمكن أن تؤدّي السخونة المتولِّدة في حوافه الأمامية نتيجة الاحتكاك إلى درجات حرارة تصل إلى 1400 مْ. ويمكن لدرجة حرارة العودة إلى جو الأرض أن تكون أعلى من ذلك، حيث تقترب من 1700 مْ، وهذه درجات حرارة تفوق كثيراً درجات حرارة عمل المعادن[137][26]. فإذا افترضنا تساوي الأوزان، أمكن للـ ك/ك أن يتحمّل درجات حرارة أعلى لفترات أطول مما تتحمله أي مادة أخرى مقاومة للحرارة. أما مقاومتها للصدمة الحرارية فتسمح بالانتقال السريع من 160- مْ في الفضاء البارد إلى ما يقارب 1700 مْ في أثناء دخول جو الأرض، من دون حدوث تصدّعات. صحيحٌ أن مكوك

الفضاء هو أشهر مثال للتحجيب الحراري بالـ ك/ك بهدف دخول الغلاف الجوي، إلا أن معظم قطع التحجيب المنتَجة اليوم تُستخدم في مخاريط أنوف الصواريخ القذفية (Ballistic missile). إن جميع الصواريخ النووية الاستراتيجية الأميركية والبريطانية والفرنسية تستخدم حُجُب الـ ك/ك الحرارية التي توفّر مقاومة نيران حتّية ومقاومة حرارية داخل المكوِّن الإنشائي. إن الغرض الرئيس من التحجيب هو حماية طاقم القيادة (في حالة المركبة المأهولة)، أو أجهزة القياس من الحرارة المستعرّة في أثناء دخول الغلاف الجوي. والـ ك/ك الثلاثي الأبعاد هو أفضل مادة تتحمل حرارة الدخول إلى جو الأرض.

تزداد درجة حرارة السطح فجأة تقريباً عندما تدخل المركبة جو الأرض، إلا أن الناقلية الحرارية للـ ك/ك الغرافيتي الثلاثي الأبعاد كبيرة بقدر كافٍ لدرء التحميل السطحي الحراري الميكانيكي، ومنع تصدّع السطح بسبب ذلك الارتفاع المفاجئ. يُضاف إلى ذلك أن السخونة النوعية للـ ك/ك عالية إلى حد أن القطعة تعمل عمل المصرَف الحراري، ممتصّة السيالة الحرارية من دون مشاكل. أما معدّل حتّ الـ ك/ك الحراري واهترائه، الذي يحصل بسبب سرعة الهواء، فيعتمد كليّاً على أحجام حُبَيبات مادته. تتصف المنتجات المكثفة بسيرورة الكربنة والتشريب بالكبس الحار المتساوي الضغط HIPIC بشكل حُبَيباتها الناعمة وبمساميتها القليلة، ولذا فهي تمتلك مقاومة استثنائية للحتّ الحراري. إلا أن ثمة مشكلة في بناء مكوِّنات كبيرة المقاس من قبيل تلك المستخدمة في الحواف الأمامية ومخروط الأنف في المكّوك الفضائي. إنه من غير الممكن صنع قطع كبيرة وسميكة بتوضيع الأبخرة كيميائياً، ولذا فإن السبيل الوحيد المتاح هو استخدام الراتنجات الحرارية التصليد. تُصنع حواف مكّوك الفضاء الأمامية ومخروط أنفه عادةً من نسيج كربوني ثنائي الأبعاد مشرَّب

براتنجات فينولية مكربنة حتى نحو 1000 مْ. وتُجرى إعادة التشريب باستخدام الفوران أو مزيج الفوران والزفت، وثمة حاجة إلى أربع دورات من إعادة التشريب عادةً. وتُحمَى المواد الفضائية التي تعود إلى الأرض والمزوَّدة بالـ ك/ك من الأكسدة عادةً، خصوصاً إذا كانت قطعها مصممة لإعادة الاستخدام، كما في مكّوك الفضاء.

من تطبيقات مواد الـ ك/ك الأخرى مادة التحجيب الحراري المستخدمة في مكّوك الفضاء الروسي بوران[138] (Buran)، وفي نظم الحماية الحرارية في الكثير من المواد الفضائية، والمسابر العلمية وتجهيزات القياس الفضائية[139]، وفي مكّوك الفضاء الأميركي[140]. ونتيجة كارثة تحطم المكّوك كولومبيا في عام 2003، وبُغية توفير فرص أفضل لطواقم المكّوك للنجاة من تأذّي نظم الحماية الحرارية كذاك الذي أدى إلى سقوط كولومبيا، تقوم وكالة الفضاء الأميركية NASA بتطوير طرائق للعثور على الخلل في نظم الحماية الحرارية وتصحيحه في المدار، وهذا شيء لم يكن طاقم كولومبيا مؤهّلاً لفعله.

وقد طوَّر مهندسو ناسا فعلاً نوعاً من حاقن حشوة متطوراً جداً يُعلَّق بنطاق الجعبة الخلفية لبذّة رائد الفضاء، ويحتوي على مواد تُخلط في داخله وتُقذف على قرميدات السيراميك المتضررة. وقد كانت نتائج الاختبارات الأرضية لدى مركز جونسون الفضائي (Johnson Space Center)، للحاقن في الخلاء، وفي حجرة صمِّمت لتحاكي الدخول في الغلاف الجوي، ناجحة. وبدأ روّاد الفضاء بصياغة إجراءات الإصلاح.

ويمثّل إصلاح اللوحات المقوّاة بالـ ك/ك تحدّياً، إلا أنه جرى تطوير تقنية لإصلاح فوهات محرّكات الصواريخ المصنوعة من الـ ك/ك. تُستخدم في هذه التقنية رقعة من الـ ك/ك التي تُشوى مع

لاصق وتُحشر في الشق على غرار الإسفين البلاستيكي المستخدم في تعليق الصور على الجدران ذات الألواح الجصية. ويقوم رائد الفضاء بتطبيق الرقعة على بقعة الـ ك/ك المتضررة، ويحقن قطرة من الحشوة خلفها، ويترك رأس البرغي في الخارج كي يزول بالاحتراق في أثناء دخول الغلاف الجوي.

ولفحص مركبة في المدار، اقترح مهندسو ناسا ذراعاً روبوتية تشابه واحدة بُنيت لاختبار مفاعيل الأسطوانة المائية (Plume Effect) الناجمة عن نظام التحكّم في سلوك المكّوك في أثناء مقاربة جو الأرض. وقد بيّنت النمذجة الحاسوبية أن كاميرا موضوعة في نهاية الذراع يمكن أن تُعاين حواف المركبة البطنية والأمامية، ويُرجَّح أن تصبح آلة معتمدة في التحليقات المستقبلية.

### مكوّنات محرّكات الطائرات

يمكن تحسين الكفاءة الترموديناميكية للمحرّكات الحرارية والعنفات الغازية كثيراً مع ارتفاع درجات حرارة العمل. لذا ثمة حافز قوي لتطوير مكوّنات للمحرّكات النفاثة من الـ ك/ك. حينئذٍ، من أجل قدرة الخرج نفسها، يمكن جعل المحرّكات أصغر وأخف وأكثر كفاءة من حيث استهلاك الوقود. إن متانة الـ ك/ك، عند الصدم على وجه الخصوص، تساوي مئة ضعف من متانة السيراميك المعهود. ويمكن صنع المحرّكات النفاثة على شكل قطعة واحدة باستخدام الـ ك/ك، وهذا ما يخفّض تكاليف التصنيع والتجميع. لذا، من الممكن جداً اختيار الـ ك/ك لتكون مادة إنشائية لهيكل الطائرة الرئيس. ومن حيث الخواص، الـ ك/ك هو الخيار المثالي لمكوّنات المحرّكات الساخنة، إلا أن استغلال تلك الخواص لهذا الغرض محدود جداً بسبب مشاكل الأكسدة. وما لم يُطوَّر طلاء واقٍ قادر

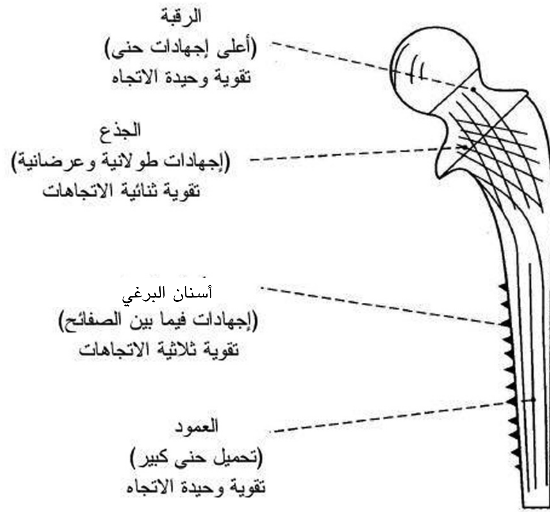
على تحمُّل الدورات الحرارية الشديدة في أجواء مؤكسدة قاسية، فإنه من غير المحتمل استغلال الـ ك/ك في مجال المحرّكات النفاثة. ثمة عدد من منتجي المواد منغمس في مشاريع برامج بحوث مشتركة مع مصنِّعي المحرّكات الجوية، وقد تم صنع مجموعة من النماذج. لكن حتى الآن، لم ينجح أحد في صنع قطعة مناسبة للطيران. من حيث متطلبات المتانة العالية، فإنه من الأرجح أن تُفضَّل التشكيلات الثلاثية الأبعاد، مع أن صعوبات وتكاليف الإنتاج يمكن أن تفرض استخدام البنية البسيطة الثنائية الأبعاد أولاً.

## التجهيزات الطبية الحيوية

من المعروف أن عنصر الكربون يتصف بأفضل توافق حيوي، خلافاً لجميع المواد المعروفة[141]. فهو متوافق مع العظام والدم والنُسج الرخوة. قد يبدو لأول وهلة أن تكلفة الـ ك/ك العالية، مقارنةً بتكاليف المواد المنافسة المعدنية أو البوليمرية في حقل الطب الحيوي، قد تمنع استخدامه. لكن تأمَّل في صفيحة معدنية صلبة من قبيل تلك التي تُستخدم عادة في تجبير الكسور. إن هذه القطعة، حين تثبيتها على عظمة طويلة مثل عظمة الفخذ، فسوف تؤدّي حتماً إلى تغيّر توزُّع الضغط فيها. من ناحية أخرى، يقل مُعامل يونغ في العظم عموماً بمقدار عشرة أضعاف عن ذاك الذي لصفيحة من الفولاذ العديم الصدأ، لها مساحة المقطع العرضاني نفسه تقريباً[142]. لكن صفيحة من هذه الخليطة سوف تنقل 90 في المئة من الحمل، وهذا ما يجعل العظمة التي تحملها تتحول إلى إسفنجية. لذا من الضروري إزالة هذه الصفيحة بعد شفاء الكسر فوراً، وعدم القيام بذلك سوف يؤدّي على الأرجح إلى كسر تلقائي في وقت لاحق.

صحيحٌ أن المعادن تمتلك القوة والمتانة اللازمة لاستخدامها في

طور الاستشفاء، إلا أنها أبعد من أن تكون مُرْضية. أما الـ ك/ك، فيمكن هندسته بطريقة تكون له خواص ميكانيكية مشابهة لخواص العظام (انظر الشكل 3 ـ 35)، وبذلك تنتفي الحاجة إلى إزالته بعد الشفاء. ثمة الكثير من الاهتمام بمواد مثل الـ ك/ك التي تُعتبر نشطة حيوياً (Bio-active) في مجالات عدّة من جراحة زراعة العظام. والغرض من ذلك هو استخدام مادة قادرة على تحفيز تشكُّل عظم، لا نسُج رخوة، في الملتقى. وقد جرى تجريبياً تبيان أن الـ ك/ك يتلاشى حيوياً في مثل تلك التطبيقات، حيث يستعيض الجسم عنه تدريجياً بالعظم[137].



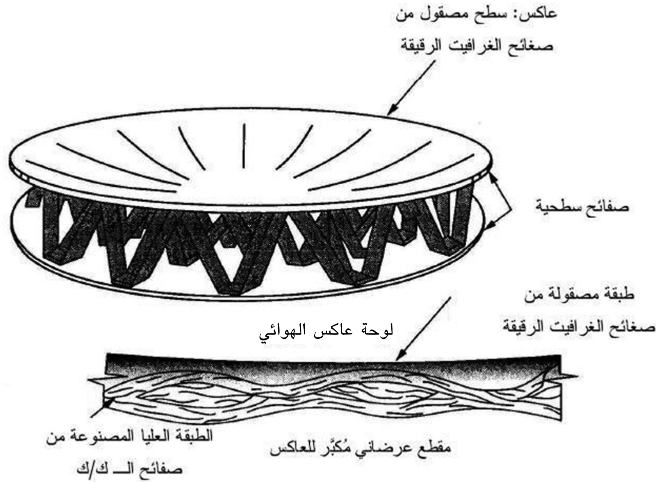

**الشكل 3 ـ 35: مخطط توضيحي لقطعة صنعية بديلة لوصلة وركية مصنوعة من الـ ك/ك مصممة لمحاكاة عظم الفخذ.**

لكن لأسباب واضحة، يستغرق الحصول على رخصة في استخدام المواد مدة طويلة. لذا فإن استخدامات الـ ك/ك الطبية الحيوية محدودة جداً. إلا أن ثمة تقارير في المنشورات عن استخدامه في القلوب الصناعية للحيوانات[141]، وفي مثبتات الألياف الكربونية في الأربطة الصناعية[143]، وفي الاستبدالات أو التعويضات العظمية[144].

## تطبيقات الـ ك/ك الصناعية وغيرها

### اللوحات العاكسة

استمر الباحثون في تطوير صحون هوائيات راديوية عاكسة خفيفة الوزن، تحتوي على سطح من صفائح الـ ك/ك يحمله هيكل داخلي من الـ ك/ك أيضاً. الشيء الجوهري في تصنيع مثل هذه الصحون هو تقنية ترسيب صفائح السطح تمهيداً لصقلها كي تكوِّن سطح المرآة النهائي. إن التكثيف ضروري لمنع تلطُّخ السطح بألياف الكربون. يحصل التلطخ في أثناء المعالجة الحرارية لألياف الكربون المشرَّبة بالراتنج، التي سوف تصبح المادة المركَّبة ك/ك، عند درجة 2200 مْ، حيث يتفكّك راتنج السطح، تاركاً قماشاً منسوجاً مكشوفاً. لكن عندما يكثَّف المركَّب تكثيفاً صحيحاً، يمكن صقل السطح ليصبح ناعماً (انظر الشكل 3 ـ 36).




**الشكل 3 ـ 36: الطبقة السطحية المصنوعة من صفيحة غرافيت رقيقة مصقولة صقلاً ناعماً.**

بقطع النظر عن تقنية إنهاء السطح المنتقاة، فإن رقائق الغرافيت مستقرة حرارياً استقراراً يكفي لتحمل درجات الحرارة العالية في أثناء المعالجة، وهي مستقرة حرارياً في أثناء الاستخدام. وهي توقف انتشار صدوع السطح الميكرويّة في مادة الـ ك/ك التي تحت السطح. وهي، أكثر من ذلك، تغطي المادة المركَّبة بإحكام، مانعة أي غبار كربوني من التسرّب إلى الخارج.

## شبكات مسرِّعات الشوارد

صُنِعت شبكات مسرِّعات الشوارد من مادة ك/ك باستخدام شريط من ليف الكربون الوحيد الاتجاه ليكون المادة الابتدائية. أما مبرر استخدام الشريط (بدلاً من قماش الليف الكربوني المنسوج الذي استُخدم سابقاً) فهو أن الشريط يوفّر إمكانية صنع شبكات أنعم وأكثر استواء. وقد طوِّرت شبكات الـ ك/ك لتكون بديلاً لشبكات الموليبدن التي وُجد أنها تهترئ بسرعة، وتصبح مشوّهة بالتمدّد الحراري التفاضلي في أثناء العمل إلى حد تتدنَّى عنده كفاءتها.

بينت الاختبارات المبكرة أن عمر شبكات الـ ك/ك يساوي 10 أضعاف شبكات الموليبدن. أكثر من هذا، وبسبب التمدّد الحراري المنخفض، حتى السلبي، لشبكات الـ ك/ك، فإن التشوّه الحراري لم يعد كبيراً بالقدر الذي يكفي لحصول نقص ملحوظ في كفاءتها. إلا أنه تبيَّن أن شبكات الـ ك/ك، المصنوعة من قماش ألياف كربون منسوجة (وهي مادة الخامة الأولية المعهودة)، لا تتصف بالاستواء والجساءة اللازمة لتحقيق الدقة التي تتطلبها بصريات الشوارد (Ion Optics).

يوفّر شريط ألياف الكربون الوحيد الاتجاه مزايا عدّة مقارنة بقماش ألياف الكربون المنسوجة: فهو يعطي مرونة أكبر في توجيه

الألياف، وهو رقيق إلى حد يمكِّن من تكديسه في طبقات رقيقة متعدّدة لصنع قطع رقيقة ذات توضّعات متوازنة، وقابل لتشكيل سطوح أشدّ نعومة من تلك التي تعطيها الخامات الأولية المنسوجة. وقد أُدخل استخدام شريط ألياف الكربون الوحيد الاتجاه، بوصفه مادةً أولية، في تصنيع نماذج أولية لشبكات ك/ك سماكتها تساوي 0.41 ملم ويقع استواؤها ضمن 0.025 مم. وكان أيضاً على النماذج الأولية أن تُبدي جساءة عظمى ضد الحني على طول صفوف من الثقوب المصطفة في أنماط سداسية.

بدأت سيرورة التصنيع التي ابتُكرت لتحقيق هذه المتطلبات بتوضيع متوازن لأشرطة الليف الوحيدة الاتجاه، حيث وُجِّهت الألياف في الطبقات المتتالية في سلسلة من الزوايا [0، 60، 60-] بحيث تكون الألياف في كل طبقة موازية لصف واحد من الثقوب. بعد التوضيع، تُحمل قطع الكربون بواسطة مثبّتات تسمح للغازات بالعبور من خلالها. وتُعرَّض القطع المثبّتة إلى دورات من تسريب البخار كيميائياً والمعالجة الحرارية عند درجات حرارة تبلغ 3000 مْ، وذلك للحصول على مادة ك/ك ذات جساءة عظمى. وثمة معالجة حرارية طويلة أيضاً عند 2200 مْ تؤدّي إلى استرخاء الإجهادات من القطع وهي مثبتة على نحو مستوٍ.

وقد وُجد أن الجلخ بالصدمة فوق الصوتية (Ultrasonic Impact Grinding) مناسب لفتح ثقوب في صفائح الـ ك/ك لصنع شبكات مسرّعات الشوارد. فالثقوب المفتوحة بالتشغيل بالأمواج فوق الصوتية تتصف بالجدران الناعمة المستقيمة، مع حواف حادة جيدة التحديد.

ما زالت شبكات مسرِّعات الشوارد تُصنع من المعدن حتى الآن. أما استخدام شبكات الـ ك/ك فما زال موضع بحث مستمر في مسعى إلى زيادة مدة حياة المسرِّعات المستقبلية وتحسين أدائها. إن

تصنيع مثل هذه الشبكات يتضمن عادةً فتح آلاف عدّة من الثقوب المتجاورة التي تتراوح أقطارها بين 1 و2 مم.

ونظراً إلى أن الـ ك/ك خامل كيميائياً، فإن الحفر الكيميائي (Etching) ليس ملائماً لفتح الثقوب. ويمكن للتثقيب الميكانيكي المعتاد أن يؤدّي إلى كسر مادة الشبكة في ما بين الثقوب، وخصوصاً، إذا كانت نسبة المساحة المثقّبة تزيد على 70 في المئة. ويحصل هذا لأن الألياف تعلق بريشة التثقيب التي تنزعها من مادة الحاضنة المحيطة. يمكن استخدام التثقيب بالليزر، إلا أنه يعطي ثقوباً ذات أشكال تشابه فوهات البراكين. وأسوأ من هذا أن السفع بالنفث المائي (Water Jet Blasting) يسبّب تكسير قطع كبيرة من المادة، معطياً ثقوباً ذات جودة متدنية.

في التثقيب بالصدمة فوق الصوتية، توضع مادة كاشطة في منطقة التماس بين أداة القطع والقطعة المشغَّلة، وتُحرَّض اهتزازات، مطالاتها من رتبة بضعة الأجزاء من المئة من الميليمتر، وتردّداتها من رتبة الـ 20 كيلو هرتز، في أداة القطع باستخدام محوال (Transducer) كهروضغطي أو كهرومغنطيسي تحرِّضه إشارة لها ذاك التردّد. وتنتقل الاهتزازات من أداة القطع إلى الجُسيْمات الكاشطة، جاعلةً الجُسيْمات تحفر ثقباً في القطعة المشغَّلة. إن هيئة الثقب في هذه الطريقة تطابق إلى حد بعيد هيئة أداة القطع.

## صناعة الزجاج

تتضمن آلية صناعة القوارير الزجاجية إرسال مقدار صغير من الزجاج المصهور، تسمّى القطرة الزجاجية، عبر قناة إلى قالب حيث يحصل تشكيل القارورة بضغط الهواء. والجهاز مصمَّم على نحو يمكن فيه كشف حصول تلف في القالب. حينئذٍ يرفض معترض

(Interceptor) القطرة المتجهة إلى القالب ويوجّهها بحيث لا تسد الآلة. إن المعترضات المصنوعة من الـ ك/ك، وبرغم كونها أغلى بمئة مرة من الأسبستوس (الأميانت) الذي تحل محله، تؤدّي إلى عدد أصغر من الاستبدالات وتوقفاً عن العمل أقل تكراراً، ولذا تُعتبر مجدية اقتصادياً. والـ ك/ك الثنائي الأبعاد أقل خطراً على الصحة بطبيعته من الأسبستوس، إضافة إلى أنه يعمل عمل الحجاب الحراري الذي يحمي المكوِّنات المعدنية التي تحمله.

**المثبّتات الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية**

تصبح مقاومة الشدّ في معظم السيراميكات والمعادن والخلائط المقاومة حرارياً ضعيفة جداً عند درجات الحرارة التي تزيد على 750 مْ. لذا فإن التثبيت الميكانيكي عند درجات الحرارة العالية يؤدّي غالباً إلى مشاكل كبيرة في التصميم الهندسي. أما البراغي والعزقات والأوتاد وغيرها مما هو مصنوع من الـ ك/ك، فلا تعاني نقصاً في مقاومتها عند درجات الحرارة العالية. إن مقدرة الـ ك/ك على حمل الأثقال أقل من تلك التي للمعادن عند درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة، لكنها تفوقها عند درجات الحرارة العالية.

لقد جرى تطوير طريقة معالجة جديدة في اليابان تتضمن خيوطاً مشكَّلة أولياً، يُقال إنها تخفِّض كثيراً كلاً من التكلفة ومدة التصنيع[145]. تتضمن طريقة الخيوط الأولية تلك، المسجّلة اختراعاً، إنتاج خيط مكوَّن من شلة من ألياف الكربون في مادة أولية حاضنة مكوَّنة من مسحوقي مادتي الكوك والزفت الرابطتين. يُغلَّف الخيط بقميص مرن حراري التلدّن يحتوي على المسحوق في أثناء تداوله ومعالجته لاحقاً. تضمن سيرورة التصنيع المبسطة هذه نفاذاً أشدّ للرابط في شلة ألياف الكربون، مؤدّية بذلك إلى مقاومة شدّ أعلى مما في مواد الـ ك/ك المعتادة. يضاف إلى ذلك أن مسحوقَي

الحاضنة غالباً ما يُشتقّان من رواسب معالجة النفط، وهذا ما ينطوي على مفاعيل بيئية جيدة.

بيَّنت الأبحاث أن مواد الـ ك/ك الوحيدة الاتجاه المصنَّعة بهذه الطريقة المبسّطة تحقّق مقاومة بين 414 و670 ميغا باسكال، مقارنة بـ 70 ميغا باسكال لمواد الـ ك/ك المعهودة. وهي أيضاً تتصف بمعامل مقاومة للحني عالٍ بقدر كبير.

يمكن للخيوط الأولية هذه أن تُنسَج على شكل صفائح أو تُقطَّع لملء قالب، ثم تكبس حرارياً لتكوين المادة المركَّبة. ونظراً إلى انتشار ألياف التقوية انتشاراً متجانساً ضمن الحاضنة، فإن خواص المادة المركَّبة الناتجة تكون متجانسة إلى حد بعيد.

تمتلك الخيوط الأولية تلك قابلية ممتازة للتشغيل والمعالجة. على سبيل المثال، يمكن صنع أنابيب وقضبان وبوتقات منها، إضافة إلى صفائح وحيدة الاتجاه، وأقمشة سميكة، وأشرطة، وخيوط مقطعة. إن قابلية الخيوط للتشكيل تسمح بتفصيل المادة لتتحمَّل أحمال تصميم مختلفة. وهذه الطريقة مناسبة جداً أيضاً لإنتاج مكوِّنات وأشكال معقّدة ذات انحناءات بأنصاف أقطار صغيرة. تتوفّر هذه المواد المركبة بشكل غير مشغَّل، وعلى شكل منتجات منتهية كالنوابض اللولبية والقضبان والرفوف والعزقات والبراغي وسيور النقل وأجزاء العربات والأفران.

### قوالب تشكيل المعادن الفائقة اللدانة

يُعتبر تشكيل المعادن الفائقة اللدانة حديثاً نسبياً، وهو نهج غني لتصنيع مكوّنات معقّدة الأشكال، بخاصة في الصناعات الجوية والفضائية. وخلائط التيتانيوم، خصوصاً، تتطلب درجات حرارة في مجال الـ 1000 مْ، وضغوطاً تساوي عدة أضعاف من الضغط الجوي لتشكيلها. وقوالب الـ ك/ك توفّر تحسينات كبيرة، مقارنة بمنافسها،

أي الفولاذ الطري، عند استخدامها لتشكيل خلائط التيتانيوم. ونظراً إلى أنها أخفّ منه بنحو مئة مرة، فإن كتلتها الحرارية المخفَّضة توفّر دورات معالجة أقصر وتداولاً أشدّ سهولة. أكثر من هذا، يؤدّي تمدّدها الحراري شبه المنعدم إلى سماحيات أكبر، ويمنع انطواء التيتانيوم ضمن القالب.

## قوالب الكبس الحراري

يمكن إنتاج السيراميكات والمعادن العالية الجودة بالتلبيد الحراري تحت ضغط ميكانيكي في عملية كبس حار[146]. والمادة المعتاد استخدامها في صنع القالب هي الغرافيت المتعدّد البلّورات. يجب أن تكون لهذه القوالب سماكة جدران كبيرة بسبب خواص الغرافيت الميكانيكية الضعيفة. أما القوالب التي تُصنع من الـ ك/ك فتصمَّم خصّيصاً بمقاومة شدّ حلقية كبيرة لتقليص مقاس القالب المطلوب على نحو ملحوظ. إن قالب ك/ك ذا قطر داخلي يساوي 130 مم، على سبيل المثال، يحتاج إلى سماكة جدار لا تزيد على 15 مم. وبذلك يمكن تحقيق دورات تسخين أقصر وتوزّع حرارة أكثر تجانساً في منتج الكبس الساخن[147].

## مجاري الغازات الحارة

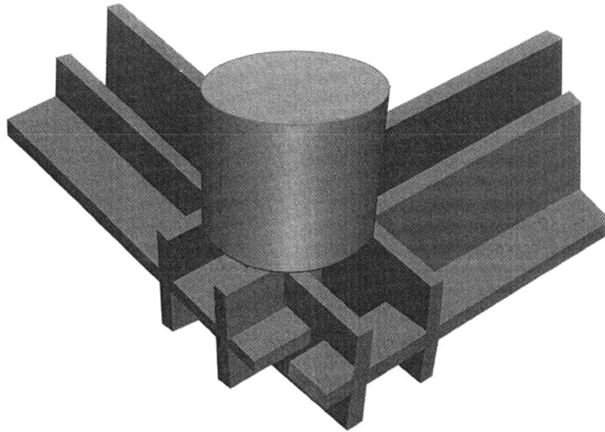
إن مقاومة أنابيب الـ ك/ك للشدّ عند درجات الحرارة العالية، إضافة إلى مقاومتها للصدمة الحرارية والتدرُّج الحراري، تجعلها خياراً مثالياً لتكون بطانة في مجاري الغازات الحارة في المفاعلات النووية العالية الحرارة[148].

## عناصر تسخين الأفران ومنصات التلقيم

تُستخدم في الأفران العاملة عند درجات حرارة بين 1000 و3000 مْ في جو غير مؤكسد عناصر تسخين غرافيتية. وتجعل هشاشة

الغرافيت ومقاومته المتوسطة تلك العناصر صعبة التداول وعرضة للتلف، خصوصاً حينما يكون المطلوب أشكالاً هندسية معقّدة. أما عناصر الـ ك/ك فهي أقل هشاشة من عناصر الغرافيت بكثير، وتمثل مزية كبيرة في تجهيزات الكبس الحراري المتساوي الضغط، حيث لا حاجة إلا إلى حيّز صغير، وهذا ما يزيد من حجم المنطقة المتاحة للاستخدام من الفرن. وإلى جانب مزايا الخواص الميكانيكية، تمكِّن المقاومة الكهربائية العالية للـ ك/ك من عمليات عالية القدرة، ووصلات كهربائية أقل حجماً.

وتتيح منصات التلقيم استخداماً أكثر كفاءة لحيّز التسخين في الفرن. تاريخياً، كانت هذه المنصّات تُصنع من خلائط حرارية، أو من سيراميكات أو غرافيت، تبعاً لدرجة حرارة العمل. واستخدام الـ ك/ك الخفيف الوزن والمقاوم للصدمات يوفّر مزيداً من حيّز الفرن المتاح ويزيد عمر هذه المنصّات. يُضاف إلى ذلك أن الكتلة الحرارية المنخفضة لقطعة الـ ك/ك تزيد من كفاءة السيرورة، وتقلِّص كثيراً فترات دورات التسخين والتبريد.



**الشكل 3 ـ 37: بنية نسائقية نموذجية لمنصب ك/ك ذي أشكال متقاطعة**[149].

بالاستعاضة عن المنصب الشائع بمنصب من الـ ك/ك (انظر الشكل 3 ـ 37) يمكن تجنّب أو تخفيف معظم المشاكل السابقة، مع تحقيق بعض المزايا الإضافية، منها:

● انخفاض في وزن الحامل، يصل في بعض الحالات إلى 80 في المئة. وينطوي هذا الانخفاض على زيادة في وزن الحمل الصافي، وما يرافقه من زيادة في معدل الإنتاج وانخفاض في التداول اليدوي.

● غياب تشوّه المنصب، وهذه هي الخطوة الأولى نحو أتمتة السيرورة.

● امتصاص حراري أصغري من قبل المنصب، بسبب معامل الامتصاص الحراري الصغير لمواد الـ ك/ك الناجم عن الوزن المقلَّص. وهذا يقود إلى مزايا أخرى، فالتوزُّع الحراري يكون متجانساً لأن المنصب يمتصّ قليلاً من الحرارة، وتنتُج من ذلك قطع مشغَّلة متجانسة التسخين وذات جودة أفضل.

● قصر مدد المعالجة، لأن العطالة الحرارية للجملة برمتها تصبح أقل.

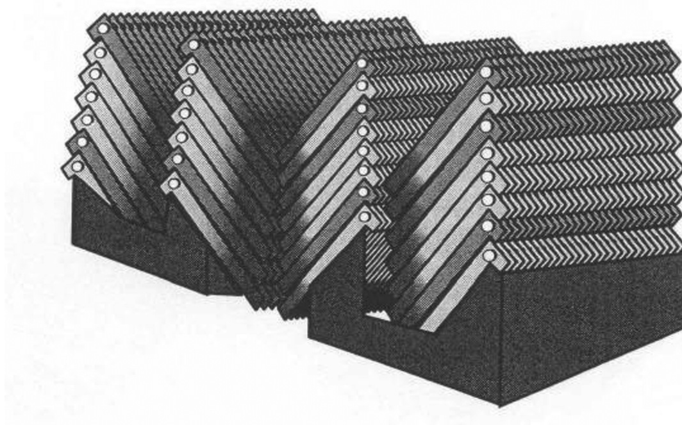
● انخفاض تكاليف توليد الحرارة، والتكاليف المتناسبة مع مدة المعالجة الحرارية.

● تحسُّن في السلوك من حيث الإجهاد الحراري، ومقاومة حرارية أفضل (الـ ك/ك خامل كيميائياً). وهذا يؤدّي إلى عمر أطول للمنتج.

● تركيب نسائقي (Modular) مفتوح مرن يحقّق نقلاً حرارياً أمثلياً إلى القطع المعالجة، ويوسّع مجال المنتجات التي يمكن معالجتها[149].

لقد تقرر استبدال المنصب الفولاذي الأصلي المقاوم للحرارة باستخدام مواد مركَّبة. وكان التصميم الناتج حاملاً ذا نسيقات مستقلة متكررة (الشكل 3 ـ 38) مكوّنة من مثبّتات من الـ ك/ك توضع عليها الأدوات التي سوف تُعالج حرارياً. تُجمع الأدوات وتوضع فوق منصب الـ ك/ك بميل محدّد، بحيث تتوضع بميل يساوي 45 مع الأفق. والفوائد التي تحقّقت من ذلك تضمن الآتي:

- تحسُّن الجودة نتيجة تحقيق موسِطات الجودة.
- زيادة بمقدار 70 في المئة في الحمل الصافي.
- انخفاض في تداول الأدوات وتحميلها وتنزيلها يدوياً.
- ربح اقتصادي كبير وفترات قصيرة لاسترجاع رأس المال المستثمر.



**الشكل 3 ـ 38: منصب مصنوع من ك/ك لمعالجة الأدوات حرارياً**[149].

على سبيل المثال، بلغ الاستثمار في 10 مناصب نحو 000 120 دولار. وقُدِّر الوفر الناجم عن زيادة الحمل الصافي بـ 000 40 دولار،

والوفر الناجم عن تقصير فترات التحميل والتنزيل بـ 000 50 ألف دولار. ونجمت عن ذلك مدة استرجاع لرأس المال ساوت 1.3 سنة. وما زالت الحوامل مستخدمة حتى الآن منذ ثلاث سنوات من دون تلف أو عيب. ووفّر برنامج تحسين لاحق إمكان أتمتة تحميل الأدوات على وحدات الـ ك/ك وتنزيلها منها، إضافة إلى أتمتة تكديس تلك الوحدات على الحامل.

وفي تطبيق لاحق آخر، مكَّنت الشبكات المصنوعة من الـ ك/ك من زيادة الحمل الصافي، ومن استمثال المنصب من أجل سيرورة لأْم، حيث تُلأم المكوِّنات، وهي مبادلات حرارية لعربات تجارية، في الخلاء عند 1120 مْ. وكان الهدف من هذا المشروع زيادة الحمل الصافي للمنصب الموجود. من الفوائد التي حقَّقها المشروع:

- تخفيض الوزن بضم مواد مختلفة معاً واستمثال استخدام الـ ك/ك.
- إنشاء نسائقي مرن يسمح بتغيير نسيقة معطوبة بمفردها من دون الحاجة إلى تبديل الشبكة بكاملها.
- سهولة تحميل القطع المشغَّلة على الشبكة وتنزيلها منها، وعدم وجود متطلبات كثيرة لتجميع وتفكيك المنصب اللذين يقوم بهما العمال بسهولة.
- زيادة الحمل الصافي بمقدار 100 في المئة، حتى وصل إلى 3000 كغ، مع وزن للحامل يبلغ 100 كغ.
- انعدام التشويه.
- تخفيض في امتصاص الطاقة يؤدّي إلى مدة معالجة أقصر.
- جودة لَأْم أفضل[149].

أخيراً، وجدت شركة فولاذ يابانية أن المناصب المصنوعة من المادة المركَّبة ك/ك الجديدة تمكِّن من بناء منصّات لتطرية مسحوق

الفولاذ أخفّ وزناً من مناصب الغرافيت المعهودة. وقد نجم عن استخدام تلك المادة تقليص مقداره 22.6 في المئة في طاقة التسخين، إضافة إلى زيادة مقدارها 80 في المئة في سرعة التسخين. يُضاف إلى ذلك أن تلك المادة ولّدت تسخيناً ذا توزع أكثر تجانساً في مسحوق المعدن.

واستخدمت الشركة Nippon Denso، وهي أكبر مصنِّع لمكوّنات السيارات الكهربائية، مواد الـ ك/ك لتزويد تجهيزات المعالجة الحرارية المستمرة لديها بالرفوف والنوابض اللولبية، وهذا ما قلَّص تكلفة الطاقة تقليصاً ملحوظاً.

أما التطبيقات الرئيسة لمادة الـ ك/ك الجديدة تلك فهي قطع للأفران وتجهيزات التسخين الصناعية الأخرى[145].

**ومن التطبيقات المتفرقة الأخرى:**

- أجزاء إنشائية للعربات ذات السرعة فوق الصوتية.
- جنيحات تبديل، وبطائن احتراق.
- عناصر تسخين، بدرجة حرارة عمل تساوي 2000 مْ.
- أعتدة توضيع الأبخرة كيميائياً، البلازمية والمنخفضة الضغط، من قبيل الأوعية القفصية والسلالم والصواني والبطائن والدعامات القفصية والحواجز.
- قطع وصل الأقطاب في أفران القوس الكهربائي.

## الخلاصة

تُعتبر مواد الـ ك/ك طائفة فريدة من المواد المركَّبة، من حيث احتفاظها بخواصها الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية جداً. وهذا، إلى جانب الدرجة العالية من المتانة والخمول الكيميائي،

يجعلها مثالية لتطبيقات في مسرح واسع من الهندسة المتقدمة. إلا أن ثمة عيبين رئيسين يحدّان من التطوير الواسع النطاق لمواد الـ ك/ك. **أولهما** أن سيرورات تصنيعها منخفضة الكفاءة، **وثانيهما** قابليتها للتأكسد السريع في الهواء عند درجات حرارة تزيد على 400 مْ.

ونتيجة ذلك، تقتصر سوق هذه المواد على التطبيقات العسكرية حيث تُنفق مبالغ كبيرة في مقابل الأداء الجيد. لكن عموماً، ثمة استطلاعات تتوقّع تزايد استخدام الـ ك/ ك اعتباراً من عام 2005 وما بعده.

من الممكن تبسيط آفاق التسويق المستقبلية لمواد الـ ك/ك بتجزئة العمل بها إلى قطاعين متمايزين. ففي القطاع التجاري، يتقيَّد استخدام الـ ك/ك في المكابح والمبادلات الحرارية وعناصر الأفران بالتكلفة فقط. فثمة عدد كبير من التطبيقات التي تحتاج كثيراً إلى خواص الـ ك/ك، شريطة تقليص السعر بتطوير سيرورات تصنيع أعلى كفاءة. أما في القطاع العسكري، فإن الأداء أشدّ أهمية من السعر. وثمة جهود مكثّفة لتطوير قطع ك/ك مقاومة للأكسدة، لمكوِّنات المحرّكات الحرارية وللتدريع الحراري للطائرة ذات السرعات فوق الصوتية، وذلك في السعي إلى نظام قابل لإعادة الاستخدام حقاً. إلا أن الحقيقة على المدى الطويل هي أن مواد الـ ك/ك سوف تبقى مواد متخصِّصة للتطبيقات التي تتطلب أداءً عالياً. وإنه لمن المشكوك فيه أن يكون ثمة تقليص كافٍ في السعر، أو تقدم بالتقانة في المستقبل القريب أو المتوسط لإدخال الـ ك/ك في الاستخدام الواسع النطاق.

## الهوامش

1. R. Stevenson, *Chem. Br.*, 27, 685 (1991).

2. E. Fitzer, *Proceedings of the 5th London International Carbon*

*and Graphite Conference* (London: Society of Chemical Industry, 3, 99, 1979).

3. R. E. Franklin, *Proc. R. Soc., Ser.* A, 209, 196 (1951).
4. S. Mrozowski, *Proceedings of the 1st and 2nd Carbon Conferences, American Carbon Society* (Buffalo, NY.: [n. pb.], 1956), p. 31.
5. S. J. Mitchell and C. R. Thomas, *Carbon*, 9, 253 (1971).
6. C. R. Thomas and E. J. Walker, *Materials in Aerospace, Proceedings of the Royal Aeronautical Society International Conference* (London: [n. pb.], 1986.
7. G. Slayter, *Sci. Am.*, 124 (January 1962).
8. J. Cook and J. E. Gordon, *Proc. R. Soc.*, A282, 508 (1964).
9. M. M. Schwartz, Emerging Engineering Materials, Boca Raton, FL: Technomic Publishing Company Inc./CRC Press, 1996, pp. 206-237.
10. A. A. Watts (Ed.), Commercial Opportunities for Advanced Composites, Philadelphia, PA: ASTM, 1980.
11. L. E. McAllister and W. Lachman, Handbook of Composites, A. Kelly and S. T. Mileiko (Eds.), Vol. 4, Elsevier, 1983, p. 109.
12. J. Jortner, Carbon, 24, 5, 1986.
13. D. E. Walrath and D. F. Adams, Report UWME-DR-904-101-1, Mechanical Engineering Department, University of Wyoming, September 1979.
14. V. Singer, JANNAF Rocket Nozzle Materials Report 5, No. 2, Laurel, MD: Joint Army-Navy-NASA-Air Force Interagency Propulsion Committee, Chemical Propulsion Information Agency, May 1983.
15. T. Edison, U.S. Patent 223, 898, 1880.
16. N. P. Freestone, Chem. Br., 26, 1184, 1990.
17. H. M. Ezekiel and R. G. Spain, J. *Polym. Sci., Polym. Symp.*, 19, p. 249 (1967).
18. D. Hull, *An Introduction to Composite Materials* (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1981).
19. J. White and M. Buechler, *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.*, 303, 62 (1986).
20. E. Fitzer, J. *Chim. Phys.*, 81, 678 (1984).
21. J. Hill, C. R. Thomas and E. J. Walker, «Their Place in

Modern Technology,» *Proceedings of the International Conference on Carbon Fibres* (London: The Plastics Institute, 1974), Paper 19.
22. C. R. Thomas, *Essentials of Carbon-Carbon Composites* (London: Royal Soc. of Chemistry, 1993).
23. R. A. Meyer and S. R. Gyetway*, Am. Chem. Soc. Symp. Ser.*, 303, 380 (1986).
24. L. E. McAllister, in: A. Kelly and S. T. Mileiko, eds., *Fabrication of Composites* (New York: Elsevier, 1983), Chap. 3.
25. J. Delmonte, in: *Technology of Carbon and Graphite Fiber Composites* (New York: Van Nostrand Reinhold, 1981).
26. A. J. Klein, *Adv. Mater. Proc.*, 130 (5), 64 (1986).
27. R. Prescott, *Modern Plastics Encyclopedia* (New York: McGraw-Hill, 114, 1988).
28. E. Fitzer, E. Muller and W. Schafer, *Chem. Phys. Carbon*, 7, 237 (1971).
29. D. A. Lovell, *Worldwide Carbon Fibre Directory*, 5th ed. (London: Pammac Publications, 1992).
30. J. V. Milanski and H. Katz, eds., *Handbook of Reinforcements for Plastics* (Amsterdam: Van Nostrand Reinhold, 1987).
31. R. M. Gill, *Carbon Fibres in Composite Materials* (London: ILIFFE Books, 1972).
32. W. Watt and B. V. Perov, eds., *Strong Fibres* (Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1985).
33. M. S. Dresselhaus [et al.], *Graphite Fibres and Filaments* (Heidelberg: Springer-Verlag, 1988).
34. G. Henrici-Olive and S. Olive, «Thermosetting Resins,» in: *Industrial Developments, Advances* in: *Polymer Science*, 51, (Heidelberg: Springer-Verlag, 1983), p. 1.
35. J. D. Buckley and D. D. Edie, *Carbon-Carbon Materials and Composites* (Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1993).
36. H. F. Volk, *Proc. Symp. on Carbon Fibre Reinforced Plastics*, Bamberg, FRG (11 May 1977).
37. J. P. Riggs, in: *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2 (New York: Wiley, 1985), p. 640.
38. J. D. H. Hughes, J. *Phys. D: Appl. Phys.*, 20, 276 (1987).
39. D. D. Edie and M. G. Dunham, *Carbon*, 27 (5), 647 (1989).
40. F. Ko, *Ceram. Bull.*, 68, 401 (1989).

41. A. Kelly and S. T. Mileiko (eds.), *Fabrication of Composites, in Handbook of Composites* (Amsterdam: North-Holland Publishing Co., 1986), 4.
42. L. E. McAllister and A. R. Taverna, *Proc. 73rd Ann. Mtg. Am. Ceram. Soc.* (Chicago: [p. pb.], 1971.
43. R. S. Barton, *SPE J.*, 4, 31 (May 1968).
44. L. E. McAllister and A. R. Taverna, *Proc. 17th Nat. SAMPE Symp.*, Paper IIIA-3 (1972).
45. P. Lamicq, Proc. *AIAA/SAE 13th Prop.* Conf, Paper 77-882, Orlando, FL, 1977.
46. C. K. Mullen and P. J. Roy, *Proc. 17th Nat. SAMPE Symp.*, Paper IIIA-2, 1972.
47. L. R. Sanders, *SAMPE Quart.*, 38 (1977).
48. J. C. Bokros, in: L. Walker, Jr, *Chemistry and Physics of Carbon* (New York: Dekker, 1969), vol. 5, p. 1.
49. W. V. Kotlensky, in: P. L. Walker, Jr., *Chemistry and Physics of Carbon* (New York: Dekker, 1973), Vol. 9, p. 173.
50. H. M. Stoller and E. R. Frye, 7*3rd Annual Meeting of the Am. Ceram. Soc.* (1971).
51. D. L. Schmidt, *SAMPE J.* (May/ June 1972).
52. J. D. Brooks and J. H. Taylor, *Nature*, 206, 697 (1965).
53. J. L. White, in: *Prog. Solid State Chem.*, vol. 9, J. O. McCauldin and G. Somarjai (Eds.) (Oxford, U.K.: Pergamon Press, 1975), p. 59.
54. G. S. Rellick, *Carbon*, 28, p. 589 (1990).
55. E. Fitzer and A. Gkogkidis, *Am. Chem. Soc. Symp. Ser.*, 303, 346 (1976).
56. «Improved Process for Manufacturing Carbon/Carbon Composites,» *AM&P*, 145 (3), 35-36 (1994).
57. W. P. Hoffman, in: «Situ Rapid Densification,» *AFRL Technology Horizons* (March 2003), pp. 33-34,
58. G. Savage, *Carbon-Carbon Composites* (London: Chapman & Hall, 1993).
59. E. Fitzer and A. Barger, *Proc. Int. Conf. on Carbon Fibres, Their Composites and Applications* (1971), 36.
60. L. E. McAllister and A. R. Taverna, *Proc. Am. Ceram. Soc. 73rd Ann. Mtg.* (1971).
61. D. F. Adams, *Mat. Sci. Eng.*, 23, 55 (1976).

62. R. A. Meyer, *Proc. Carbon 1986 Conf*, Baden-Baden, Germany, 1986.
63. J. S. Evangelides, Proc. Army. Symp. on Solid Mech., U.S. Army (1976), p. 98.
64. J. Jortner, *J. R. & E.*, Report no. 8514, p.39.
65. D. F. Adams, J. *Comp. Mats.*, 8, 320 (1974).
66. S. Kimura and R. Yamada, J. *Ceram. Soc. Jap.*, 83, 122 (1975).
67. J. X. Zhao, R. C Bradt and P. L. Walker, Jr., *Ext. Abst. 15th Biennial Conf on Carbon* (Washington, D.C: Am. Chem. Soc., 1981), p. 274.
68. B. Terwiesch., Ph.D. thesis, University of Karlsruhe, Germany, 1972.
69. S. Kimura, E. Yasuda and Y. Tanabe, *Proc. Int. Conf Comp. Mats.*, IV, 1601 (1982).
70. E. Fitzer and M. Heym, *Ext Abst. 13th Biennial Conf. on Carbon* (1977), p. 128.
71. E. Fitzer and M. Heym, *Kunstofftechnik*, 85 (1980).
72. Carbon Fibre Reinforced Carbon, Schunk promotional brochure.
73. H. C Kim, K. J. Yoon, R. Pickering, and R. J. Sherwood, *J. Mat. Sci.*, 20, 3967 (1985).
74. E. Yasuda, H. Tanaka and S. Kimura, *Tanso (Carbon)*, 100, 3 (1980).
75. M. L. Liebermann and H. O. Pierson, *Proc. 11th Biennial Carbon Conf.* (1973), p. 314.
76. G. M. Savage, Ph.D. Thesis, University of London, 1985.
77. P. Laramee, G. Lamere, B. Prescott, R. Mitchell, P. Sottosanti, and D. Dahle, *Proc. 12th Biennial Conf. on Carbon* (Washington, D.C: Am. Chem. Soc., 1975), p.74.
78. H. O. Pierson, D. A. Northrop and J. F. Smatana, *Ext. Abst. 11th Biennial Conf. on Carbon* (Washington, D.C: Am. Chem. Soc., 1973), p. 275.
79. B. Granoff and P. Apodaca, *Ext. Abst. 11th Biennial Con! on Carbon* (Washington, D.C: Am. Chem. Soc., 1973), p. 273.
80. J. L. Perry and W. F. Adams, *Carbon*, 14, 61 (1976).
81. H. Girard, *Proceedings of the 5th London International Carbon and Graphite Conference* (London: Society of Chemical Industry, 1978), vol. 1, p. 483.

82. L. E. McAllister and A. R. Taverna, E. Scala, E. Anderson, I. Toth, and B. Noton, eds., *Proceedings of the International Conference on Composite Materials* (New York: Metallurgical Society of AIME, 1976), vol. 1, p. 307.
83. C K. Mullen and P. J. Roy, *Proceedings of the 17th National Symposium* (Los Angeles: Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 1972), p. 111-A-2.
84. D. W. McKee, in: L. Walker Jr. and P. A. Thrower, eds., *Chemistry and Physics of Carbon* (New York: Marcel Dekker, 1981), vol. 16, p. 1.
85. D. W. McKee, *Carbon*, 24, 737 (1986).
86. G. R. Marin, U.S. Patent No. 3,936, 574 (1976).
87. K. J. Zeitsch, in: E. Hove and W. C. Riley, eds., *Modern Ceramics, J* (New York: John Wiley & Sons, 1967), p. 314.
88. S. A. Bortz, in: W. W. Kriegel and H. Palmour III, eds., *Ceramics in Severe Environments* (New York: Plenum, 1971), p. 49.
89. E. M. Goldstein [et al.], *Carbon*, 4, 273 (1966).
90. L. C. Ehrenreich, U.S. Patent No. 4,119,189 (1978).
91. T. Vasilos, GB Patent No. 2, 130, 567, 1983.
92. D. L. Dicus [et al.], NASA Technical Note NASA-TN-D-8358, 1976.
93. D. W. McKee, *Carbon*, 26, 659 (1988).
94. P. B. Gray, U.S. Patents No. 4,795,677 (1989), 4, 894, 286 (1990), 4,937,101 (1990).
95. J. Hill [et al.], *11th Biennial Conference on Carbon, Extended Abstracts, American Carbon Society* (Gatlinburg, TX: [n. pb.], 197)3, p. 328..
96. J. Chown, R. F. [et al.], «Refractory Coatings on Graphite,» in: P. Popper, ed., *Special Ceramics* (New York: Academic Press, 1963), p. 81.
97. E. Fitzer, *Carbon*, 16, 3 (1978).
98. R. Naslain [et al.], *Proceedings of the 4th European Conference on CVD*, Philips Centre for Manufacturing Technology, Eindhoven, Netherlands (1983), p. 293.
99. H. Hannache [et al.], *Proceedings of the 4th European Conference on CVD,* Philips Centre for Manufacturing Technology, Eindhoven, Netherlands (1983), p. 305.

100. H. Hannache [et al.], *J. Mater. Sci.*, 22, 202 (1984).
101. T. E. Strangman and R. J. Keiser, U.s. Patent No. 4,668,579, 1987.
102. D. C. Rogers [et al.], *Proceedings 7th National SAMPE Technical Conference*, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Albuquerque, NM (1975), p. 319.
103. D. C. Rogers [et al.], *Proceedings 8th National SAMPE Technical Conference, Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, Seattle, WA, 1976, p. 308.
104. D. M. Shuford, U.S. Patent No. 4,465,777, 1984.
105. D. M. Shuford, U.S. Patent No. 4,585,675 (1986).
106. H. Jehn, J. Less-Common Met., l00, 321 (1984).
107. G. St. Pierre, *Explanatory Research on the Protection of Carbon-Carbon Composites Against Oxidation*, Department of Metallurgical Engineering and Materials Science, Ohio State University, Columbus, OH, 1988.
108. K. N. Lee and W. L. Worrell, *Oxid. Met.*, 32, 357 (1989).
109. M. D. Alvey and P. M. George, *Carbon*, 29, 523 (1991).
110. P. Plotard and C. Le Floc'h, *Proceedings ESA Symposium: Space Applications of Advanced Structural Materials, Noordwijk* (Netherlands: ESTEC, 1990), p. 171.
111. H. Tretout [et al.], *Proceedings ESA Symposium: Space Applications of Advanced Structural Materials* (Noordwijk, Netherlands: ESTEC, 1990), p. 181.
112. M. M. Opeka, Carbon-Carbon Composites, *Fabrication, Properties, Joining, and Applications, Proceedings, the 19th Annual Conference on Composites*, Materials, and Structures, PT2; U.S. Defense Department, 1996.
113. S. Yalof, Materials Innovation Labs Presentation from the Interagency Planning Group Meeting on Joining of Carbon-Carbon and Ceramic Matrix Composites, T. F. Kearns, ed., April 1987.
114. P. Dadras, Joining of Carbon-Carbon Composites by Using $M_oSi_2$ and Titanium Interlayers, J. D. Buckley, ed., *14th Conf on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites Proc.* (NASA, 1990).
115. P. Dadras and T. Ngai, Joining of C-C Composites by Boron and Titanium Disilicide, Paper no. 5, 15th Conf. on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, Cocoa

Beach, FL, January 16, 1991.
116. H. Mizuhara, E. Huebel, and T. Oyama, «High-Reliability Joining of Ceramic to Metal,» *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 68(9), 1591-1599 (1989).
117. H. E. Pattee, R. M. Evans and R. E. Monroe, *Joining Ceramics and Graphite to Other Materials, NASA*, 1968.
118. M. M. Schwartz, *Ceramic Joining, Metals* (Park, OH: ASM Int., 1990).
119. M. M. Schwartz, *Composites Materials Handbook*, 2nd ed., (New York: McGraw-Hill,1992).
120. K. H. Holko, «Joining Methods for Carbon-Carbon Composite Structures,» *Adv. Mater Manufac. Proc.*, 3 (2), 247-260 (1988).
121. R. W. Rice, *Joining of Ceramics, Proc. of the 4th Army Materials Technology Conf, Advances in Joining Technology* (Chestnut Hill, MA: Brookhill, 1975), pp. 69-111.
122. J. P. Hammond and G. M. Slaughter, Bonding Graphite to Metals with Transition Pieces, Weld. J., 33-40, 1971.
123. M. M. Schwartz, *Brazing* (Metals Park, OH: ASM International, 1989).
124. E. Rudy, Compendium of Phase Diagram Data, Part V, AFML- TR-65-2, 1969.
125. P. Dadras and G. M. Mehrotra, «Joining of Carbon-Carbon Composites by Graphite Formation,» *J. Am. Ceram. Soc.*, 77(6), 1419-1424 (June 1994).
126. M. M. Opeka, ed., Development of Brazed Joints in Carbon-Carbon, Graphite, and Refractory Metal Components for Rocket Propulsion and Spacecraft Applications, Part 2, The 19th Conference on Composites, Materials and Structures, Carbon-Carbon Composites: Fabrication, Properties, Joining, and Applications, January 9-10, 1995, Cocoa Beach, FL, pp. 39-48.
127. S. Khatri, W. Altergott, T. Campbell, G. Freitas, and H. Croop, Brazing of Carbon-Carbon Composites to Refractory Metals for Actively Cooled Hypersonic Vehicle Structures, The 19th Conference on Composites, Materials and Structures, Carbon-Carbon Composites: Fabrication, Properties, Joining, and Applications, M. M. Opeka (ed.), January 9-10, 1995, Cocoa Beach, FL, pp. 611-624.

128. L. Goodman, D. L. Birx and V. R. Dave, Joining of Carbon Carbon Composites with High Energy Electron Beams, The 19th Conference on Composites, Materials and Structures, Carbon-Carbon Composites: Fabrication, Properties, Joining, and Applications, M. M. Opeka, ed., January 9-10, 1995, Cocoa Beach, FL, pp. 585-596.
129. A. C. Johnson, Carbon-Carbon Composites for Spacecraft Applications, Tech. Rept. TR.89-340, Naval Surface Warfare Center, 1989.
130. J. K. Weeks and J. L. Sommer, Carbon/Carbon Composites Incorporating Brazed Cooling Tubes, The 19th Conference on Composites, Materials and Structures, Carbon-Carbon Composites: Fabrication, Properties, Joining, and Applications, M. M. Opeka (ed.), January 9-10, 1995, Cocoa Beach, FL, pp. 597-610.
131. D. J. Holt, «Aircraft Braking Systems,» *Aerospace Engineering* (7-11 June 1993).
132. S. Birch, «A Light Touch on the Brakes,» *Aerospace Engineering*: 24-25, December 1996.
133. Carbonne Industry, SEPCARB Brakes Assistance Manual, France.
134. E. Fitzer, W. Fritz, A. Gkogkidis, and K. D. Morgenthaler, *Proc. Carbon 86 Conf, Baden-Baden, Germany* (1986).
135. M. P. Gorton, «Carbon-Carbon Piston Development,» *Lockheed Engineering & Sciences Co*. (May 1994).
136. A. R. Canfield, «Braided Carbon/Carbon Nozzle Development,» *21st AIAA/ SAE/ ASME/ ASEE Joint Propulsion Conference, July 8-11, 1985*.
137. H. O. Piers, *on, Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes* (Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1993).
138. R. P. Dickenson and M. R. Hill, «A Review of Recent Research in the Former Soviet Union on Fibrous Composites,» *Composites*, 24(5), 379-382 (1993).
139. R. B. Dirling, Jr. and D. A. Eitman, «Lightweight Carbon-Carbon Thermal Protection System for Starprobe,» *AIAA 19th Thermophysics Conference, Snowmass, CO, June 25-28*, 1984, (Irvine, CA: Science Application, 1984).
140. F. Morring, Jr., «Culture Shock,» *Aviation Wk. Sp. Technol*., 22-24 (2003).

141. P. J. Lamicqe, *SEP International Carbon Conference, Bordeaux, France, 1984.*
142. D. F. Williams, *Metals and Materials*, 7(1), 24 (1981).
143. C. Burri and R. Neugedauer, *Replacement of Ligaments by Carbon Fibres* (Munich: Springer-Verlag, 1985).
144. L. Claes [et al.], *Carbon*, 18, 383 (1980).
145. «Inteque Resources Corp.,» *AM&P* (March 1994), pp. 35-36.
146. D. W. Richerson, *Modern Ceramic Engineering* (New York: Marcel Dekker, 1982).
147. W. Hutner, A*ndernach* (29 October 1985).
148. E. Von Gellhorn and H. Gruber, *Proc. Carbon* 86 Conf, Baden-Baden, Germany (1986).
149. J. Demmel [et al.], *High-Temperature Racks, Heat Treating Progress*, 1(4), 26-32 (2001).

## المراجع

"Application of C/C Composites to the Combustion Chamber of Rocket Engines, Part 1. Heating Tests of C/C Composites with High Temperature Combustion Gases, National Aerospace Lab., Amsterdam, Netherlands.,» *NTIS Alert*: 96 (4), 12, 1995.

Botelho, E. C., N. Scherbakoff and M. C. Rezende. «Rheological Studies Applied in the Processing and Characterization of Carbon/ Carbon Composites.,» *J. Adv. Mater.*: 4, 12, October 2001.

Burns, R. W. and N. Murdie. Thermal Cycle Exposure Testing of Coated Inhibited Carbon-Carbon Composites, The 15th Conference on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, J. D. Buckley (ed.), NASA Langley Res.

Center, Hampton, VA, NASA Conf. Publication 3133, Part I, *Proceedings of Conf in Cocoa Beach, FL*, January 16-18, 1991, pp. 799-810.

C/C Composites for Rocket Chamber Applications, Part 2, Fabrication and Evaluation Tests of Rocket Chamber,

National Aerospace Lab., Tokyo, May 95, 21p, Feb. 15, 1996.

Camden, M., L. Simmons and G. Maddux. Room Temperature and Elevated Temperature High Cycle Fatigue Testing of Carbon/Carbon Coupons, Structures Div., Flight Dynamics Directorate, Wright Laboratory, WPAFB, OH, The 19th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures, Cocoa Beach, FL, January 9-10, 1995, pp. 519-530.

Christ, K. and K J. Huttinger. «Carbon-Fiber-Reinforced Carbon Composites Fabricated with Mesophase Pitch.,» *Carbon*: 31 (5), 731-750, 1993.

Chtopek, J., S. Blazewicz and A. Powroznik. «Mechanical Properties of Carbon Carbon Composites.,» *Ceramics International*: 19, 251-257, 1993.

Chuk, L. L. «Preventing Saltwater Corrosion of Carbon Fiber Composites.,» *High Tech Materials Alert*: 3-4, 15 March 1996.

Dadras, P. and T. T. Ngai. Joining of Carbon-Carbon Composites with Boron and Titanium Disilicide, The 15th Conference on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, J. D. Buckley (ed.), NASA Langley Res. Center, Hampton, VA, NASA Conf. Publication 3133, Part 1, Proceedings of Conf in Cocoa Beach, FL, January 16-18, 1991, pp. 25-38.

Dhami, T. L., O. P. Bahl and L. M. Manocha. «Influence of Matrix Precursor on the Oxidation Behavior of Carbon-Carbon Composites.,» *Carbon*: 31(5), 751-756, 1993.

Drawin, S., M. [et al.]. «Oxidation Model for CarbonCarbon Composites,» ONERA, Chatillon, France, AIAA Fourth International Aerospace Planes Conf., December 1-4, 1992, Orlando, FL, pp. 1-9.

Edie, D. D. «High Thermal Conductivity Carbon/Carbon Composites,» Final Rept., October 1992-August 1995, Clemson University, Clemson, SC, September 1995.

D. E. Glass and C. J. Camarda. «High-Temperature Testing of Components for a Carbon/Carbon Heat-Pipe-Cooled Leading Edge,» NASA Contractor Rept.

1168, April 1994.

Griesheim, G. E., P. B. Pollock, and S.-C. Yen. «Notch Strength and Fracture Behavior of 2-D Carbon-Carbon Composites.,» *J. Am. Ceram. Soc.*: 76 (4), 944-956, 1993.

Hsu, S.-E. [et al.]. « Oxidation Protection for 3-D Carbon-Carbon Composites.,» *Acta Astronautica*: 35(1), 35-41, 1995.

Joshi, A. and J. S. Lee. «Coatings with Particulate Dispersions for High-Temperature Oxidation Protection of Carbon and C/C Composites.,» *Composites Part A Applied Science and Manufacturin*g: 28(2), 181-189, 1997.

Kowbel, W. and C. H. Shan. «Mechanical Behavior of Carbon-Carbon Composites Made With Cold-Plasma Treated Carbon-Fibers.,» *Composites*: 26(11), 791-797, 1995.

Maine Studying Carbon-Carbon Composites, http://www.netcomposites.com/ news.asp?1652, accessed July 5, 2003.

Mumtaz, J. Echigoya and M. Taya. «Preliminary Study of Iridium Coating on Carbon/Carbon Composites.,» *Journal of Materials Science*: 28, 5521-5527, 1993.

Park, H. S., W. C. Choi, and K. S. Kim. «Process-Microstructure Relationships of Carbon-Carbon Composites Fabricated by Isothermal Chemical- Vapor Infiltration.,» J. *Adv. Mater.*: 26(4), 34-40, July 1995.

Pemsler, J. P. [et al.]. Oxidation Resistant Coating for Carbon-Carbon Composites at Ultra-High Temperatures, Final Rept.

Cont. N00014-92-C-0049, June I, 1994.

Randolph, J. «Carbon/Carbon Shield/ Antenna Structure.,» *NASA Tech Briefs*: June 1998, p. 78.

Ransone, P. O., H. K Rivers and G. B. Northam. «Development of Carbon-Carbon Components for Internal Combustion Engines,» NASA Langley Res. Center, Hampton, VA, The 19th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures, Cocoa Beach, FL, January 9-10, 1995, pp. 871-887.

P. Savage, Market Forecast: Carbon Fiber Composites, High-Tech Materials Alert, Tech Insights, 1-3, July 19, 1996.

D. L. Schmidt, K E. Davidson, and L. S. Theibert, Evolution of Carbon-Carbon Composites (CCC), SAMPE Journal, 32(4), 44-50, July/August 1996.

S. T. Schwab and R. C. Graef, Repair of Oxidation Protection Coatings on Carbon - Carbon Using Preceramic Polymers, The 15th Conference on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, J. D. Buckley (Ed.), NASA Langley Res. Center, Hampton, VA, NASA Conf. Publication 3133, Part 1, Proceedings of Conf in Cocoa Beach, FL, January 16-18, 1991, pp. 781-798.

J. Takahashi, K. Kemmochi, J. Watanabe, H. Fukuda, and R. Hayashi, Development of Ultra-High Temperature Testing Equipment and Some Mechanical and Thermal-Properties of Advanced Carbon-Carbon Composites, Advanced Composite Materials, 5(1), 73-86, 1995.

S. Takano, T. Uruno, T. Kinjo, P. Tlomak, and C. P. Ju. «Structure and Properties of Unidirectionally Reinforced PAN-Resin Based Carbon-Carbon Composites.,» *J. Mater. Sci.*: 28, 5610-5619, 1983.

Tsou, H. T. and W. Kowbel. «A Multilayer Plasma-Assisted CVD Coating for Oxidation Protection of Carbon-Carbon Composites.,» *J. Adv. Mater.*: 27(3), 9-13, April 1996.

P. G. Valentine and P. W. Trester, Reaction Sintering: A Method for Achieving Adherent High-Temperature Coatings on Carbon-Carbon Composites, The 15th Conference on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, J. D. Buckley (ed.), NASA Langley Res. Center, Hampton, VA., NASA Conf.

Publication 3133, Part 1, Proceedings of Conf in Cocoa Beach, FL, January 16-18, 1991, pp. 811-822.

Vaughan, W. L., P. O. Ransone and C. W. Ohlhorst, Performance of Polymeric Precursor Oxidation Protection Coatings on Carbon-Carbon Composites, The 19th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures, Cocoa Beach, FL, January 9-10, 1995, pp. 903-928.

H. Weisshaus, S. Kenig, and A. Siegmann. «Effect of Materials

and Processing on the Mechanical Properties of C / C Composites.,» *Carbon*, 29 (8), 1203-1220, 1991.

Withers, J. C. [et al.]. *Economical Processing to Produce C-C Composites for Pistons* (Merck Corp., P.O. Ransone, NASA Langley, Hampton, VA, The 19th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures, Cocoa Beach, FL, January 9-10, 1995, pp. 855-865.

Wu, T.-M., K.-K. Won and W.-C. J. Wei. «Processing and Measurement of Basic Properties of SiC and Cordierite Coatings of Carbon/Carbon Composite.,» *Surface & Coatings Technology*: 78 (1-3), 64-71, 1996.

# 4

# خلائط ومفعول تذكُّر الشكل

## تقديم

هل سمعت بالمصطلح «خلائط تذكُّر الشكل» (ختش) (Shape Memory Alloys) (SMAs) أو «مـفـعـول تـذكُّـر الـشـكـل» (Shape Memory Effect) (SME)، أو قرأت عنهما وتعجبت مما يعنيان؟

خلائط تذكُّر الشكل هي فئة جديدة نسبياً من المواد المعدنية ذات الخاصية الفريدة المتمثلة بمفعول تذكُّر الشكل. لقد أصبحت لهذه الخلائط شعبية بسبب خاصية تذكُّر شكلها، أي إن القطعة التي تتشوّه عند درجة حرارة منخفضة سوف تعود إلى شكلها الأصلي حينما تعالج عند درجة حرارة عالية.

من تطبيقات المواد الختشية القارنات (Coupling) الهيدروليكية والمآخذ الكهربائية في الطائرات، ومفعِّلات (Actuator) تحرير الهوائيات في الأقمار الصناعية، والمفعِّلات الحرارية الميكانيكية في التطبيقات الروبوتية، وصمّامات أجهزة مكافحة الحريق، ومواد تجبير العظام وزرع الأسنان، وأسلاك توجيه القسطرة في العمليات الطبية غير الجراحية[(4)(1)].

ومن الخلائط التي تتصف بمفعول تذكُّر الشكل Ni-Ti وCu-Zn-Al وAu-Cd وNi-Al[(1)(2)]. ومن الخواص اللافتة في الختشيات القائمة على الـ Ni-Ti المرونة الفائقة (Superelasticity) والتوافق الحيوي اللذان مكَّنا من التطبيقات الطبية.

إن قدرة الختشيات الفريدة على تذكُّر واستعادة أشكالها الأصلية، إلى جانب طاقة الاسترجاع الكبيرة والعلاقة الدقيقة بين الشكل والحرارة والإجهاد، أثارت كثيراً من الاهتمام بإمكانات هذه المواد في التطبيقات الصناعية والعسكرية. إلا أن معظم الختشيات المستخدمة حالياً، ومنها Ni-Ti وCu-Zn-Al وCu-Ni-Al تتصف بدرجة حرارة انتقال طوري (Phase Transfornation Temperature) تقل عن 100 مْ. وهذا يمنع استخدامها في تطبيقات البيئات العالية الحرارة، أي حيث الحاجة القصوى إليها. لكن كثيراً من المجالات الدفاعية والصناعية التي تستخدم التحكّم في الشكل وتخميد الاهتزازات في بيئات الحرارة العالية، بحاجة ماسة إلى ختشيات تعمل عند درجات الحرارة العالية، لذا يبدو أنه لا مفرّ من تطوير ختشيات عالية درجة الحرارة.

منذ أوائل سبعينيات القرن العشرين، ثابر العلماء على استغلال إمكانات الختشيات. في ذلك الوقت، بدأ بضعة علماء بدراسة مفاعيل عوامل تعدينية مختلفة، من قبيل التركيب والمعالجة الحرارية، في درجة حرارة التحوُّل المرتنزيتي (Martensite Transformation) للختشيات الموجودة آنئذٍ. وقاموا بمحاولات لرفع درجة حرارة ذلك التحويل لتصبح فوق 100 مْ، لكنهم أخفقوا في ذلك. واستمر البحث فيها طوال الـ 20 سنة اللاحقة، من دون تحقيق أي تقدم إضافي.

لكن في الآونة الأخيرة، حقَّق العلماء فتحاً في البحث في ختشيات جديدة عالية درجة الحرارة ذات درجة انتقال طوري أعلى كثيراً من تلك التي للختشيات المستخدمة عادةً. وتركَّز معظم البحث

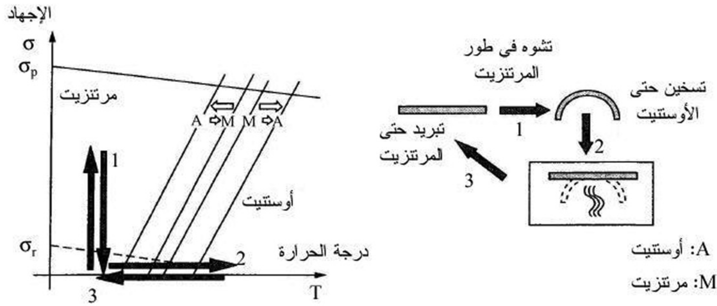
في خلائط الـ $Ti(Ni_{50-x}X_x)$، حيث (X = Pd, Pt, Au)، والـ Ni-Mn-Ti، لأنه يُعتقد أن هذه المواد هي المرشحة باحتمال عالٍ للتطبيقات العملية. ومن بين أفضل المواد المرشحة التي تتضمن $Ti\ (Ni_{50-x}Pd_x)$ و$Ti\ (Ni_{50-x}Pt_x)$ و$Ti\ (Ni_{50-x}Au_x)$، يُعتقد أن الـ $(Ni_{50-x}Pd_x\ Ti)$ هو أوفرها حظاً. فمن العيوب المتأصّلة في منظومات عدّة أن الـ $Ti\ (Ni_{50-x}Pt_x)$ يُعتبر غالياً جداً من حيث استخدامه عملياً، وأن الـ $Ti\ (Ni_{50-x}Au_x)$ غير مستقرّ في الدورات الحرارية. يمكن لدرجة حرارة الانتقال الطوري للخلائط القائمة على الـ Ni-Mn-Ti أن تصل حتى 500 مْ، لكن نظراً إلى أن هذه الخلائط هشّة وغير مستقرّة، فإنها غير صالحة للاستخدام العملي.

إن تذكُّر الشكل الوحيد الاتجاه (One-Way Shape Memory) بحد ذاته ظاهرة تستحق الاهتمام، أما تذكُّر الشكل الثنائي الاتجاه (Two-Way Shape Memory)، فقد أدّى إلى مفاهيم تطبيقية ابتكارية أكثر تقدماً.

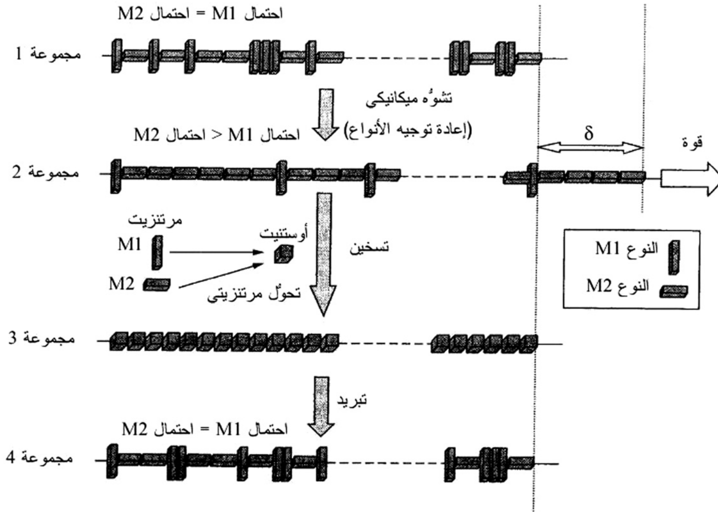
## مفعول تذكُّر الشكل الوحيد الاتجاه

يحصل مفعول تذكُّر الشكل الوحيد الاتجاه عندما تستعيد المادة، التي تشوّهت سابقاً حينما كانت في الطور المرتنزيتي، شكلها الأصلي في أثناء تسخينها إلى الطور الأوستنيتي (Austenite). يبيّن الشكل 4 ـ 1 رسماً توضيحياً لمفعول تذكُّر الشكل. يمثل المخطط البياني في الطرف الأيسر من الشكل منطقة الاستقرار لطَوْرَين على منحنى الإجهاد والحرارة[5]. تمثل الخطوط المائلة علاقة كلاوسيوس ـ كلابيرون (Clausius-Clapeyron Relation)، التي تدل على الحدود بين الطَوْرَين وعلى مدة الانتقال. انظر في شريحة ذات شكل مستوٍ بوصفه الشكل الأب (أي الشكل المُتذكَّر فإذا طُبِّق على الشريحة

إجهاد أكبر من الإجهاد الحرج $\sigma_r$، أمكن أن تتشوّه بطريقة شبه لدنة (الخطوة 1). هذا يعني أن التشوّه الحاصل في الطور المرتنزيتي هو تشوّه مستقر. وعند التسخين (الخطوة 2) حتى درجة حرارة حرجة، تنتقل المادة عندها إلى الطور الأوستينيتي وتستعيد شكلها الأصلي: الشكل الأب. وعند التبريد (الخطوة 3)، لا يُلاحظ أي تغيّر في الشكل. يجب التأكيد ثانية أن ثمة حاجة إلى التشوّه القَبْلي في الطور المرتنزيتي من أجل ملاحظة تغيُّر كبير في الشكل. وهذا هو تعليل الصفة «وحيد الاتجاه» التي تصف هذا المفعول. من حيث شكل المادة في المستوى الجهري، هذا المفعول لا يحصل في الاتجاه المعاكس: فعند التبريد، تحتفظ المادة بشكلها الأوستنيتي. والسبب هو أن المرتنزيت غير الموجّه يتكون في أثناء التبريد، ولذا يكون للبُنى البلّورية المرتنزيتية والأوستنيتية الشكل نفسه في المستوى الجهري. وثمة حاجة إلى التشوّه القَبْلي في الطَور المرتنزيتي لتكوين بعض المرتنزيت الموجَّه ومن ثَمَّ رؤية تغيُّر الشكل عند التسخين والانتقال إلى الطور الأوستنيتي.




**الشكل 4 ـ 1: مفعول تذكُّر الشكل الوحيد الاتجاه.**




**الشكل 4 ـ 2: وصف ظاهرة التحوُّل الطوري في حالة نوعين من المرتنزيت.**

التفسير الإحصائي لهذه الظاهرة هو أن مرتنزيتي عشوائي التوزُّع يتكوَّن في أثناء التبريد، ولذا فإن تشوُّه الشكل الذي كان في الطور الأوستنيتي، في المستوى الجهري، يساوي الصفر. أما مفعول تشويه المادة في طور المرتنزيت فهو تعديل توزُّع أنواع المرتنزيت المختلفة. يبيّن الشكل 4 ـ 2 وصفاً مبسطاً أحادي البعد للظاهرة بمرتنزيتين مُثِّلا بمستطيلين، أفقي وعمودي (M1, M2). في هذا النموذج، يُفترض أن المادة لا تحتوي على أي إجهادات داخلية. حينما لا يكون ثمة إجهاد مطبق على النموذج (المجموعة 1)، تكون المرتنزيتات موزعة عشوائياً: لكل نوع من المرتنزيتات الاحتمال نفسه. وحين تطبيق قوة (المجموعة 2)، يُعاد توجيه المرتنزيتات من أجل جعل الإجهاد ضمن البنية أصغرياً. لذا يتعدّل توزّع نوعَي المرتنزيت. وحين التسخين، ينتقل نوعا المرتنزيتات إلى البنية البلّورية الشكل نفسها، أي إلى الأوستنيت الأكثر تناظراً الممثّل بالمربع. إن التشكيلة التي

يكون فيها المرتنزيت ليست مهمة (المجموعة 1 أو 2، على سبيل المثال) من حيث العودة إلى الشكل الأب الذي يكون في الحالتين نفسه. وحين التبريد (المجموعة 4)، إذا لم يكن ثمة إجهاد، كان لنوعي المرتنزيت الاحتمال نفسه، ولذا سوف يبقى الشكل نفسه الذي كان في الطور الأوستنيتي.

## مفعول تذكُّر الشكل المزدوج الاتجاه

تستطيع خلائط تذكُّر الشكل المزدوج الاتجاه تذكُّر تشكيلتين، لا تشكيلة أو شكل واحد. ومع أن مفعول التذكُّر المزدوج الاتجاه معروف منذ أواسط سبعينيات القرن العشرين، إلا أن الفهم التام لآلية هذه الظاهرة لم يتحقّق حتى الآن. إن الختشيات المزدوجة الاتجاه تنطوي على إمكانات مهمة لاستخدامها للأغراض الدفاعية وفي الصناعة الخاصة بسبب مواصفاتها الممتازة. تتضمن التطبيقات الممكنة لهذه المواد المآخذ الكهربائية لنظم توجيه الصواريخ، والوصلات الهيدروليكية في المقاتلات النفاثة، والمفعِّلات في الدبابات، ومكوّنات الأقمار الصناعية، والمكوّنات الإلكترونية والحاسوبية، إضافة إلى استخداماتها الطبية والروبوتية.

ثمة أعمال منشورة تقول إن بعض الختشيات المنخفضة درجة الحرارة الحالية من قبيل NiTi وCuAlNi وCuZnAl يمكن أن تُظهر مفعول تذكُّر للشكل مزدوج الاتجاه بعد تدريب حراري ميكانيكي ملائم. وثمة أعمال أيضاً مفادها أن مفعول التذكُّر المزدوج الاتجاه لتلك الخلائط يعتمد كثيراً على إجراءات التدريب. وثمة عمل صغير مشابه أيضاً أُجري على ختشيات عالية درجة الحرارة وحيدة وثنائية الاتجاه[6].

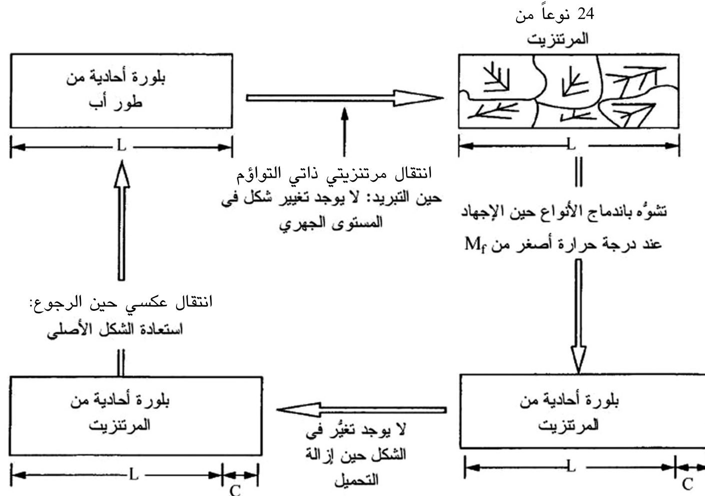
## آلية تذكُّر الشكل

عُزي مفعول تذكُّر الشكل إلى التحوُّل المرتنزيتي[1][2][7]، وهو التحول المستخدم نفسه لتقسية سطح الفولاذ. لذا فإن السؤال المنطقي هنا هو: «هل نتوقع وجود مفعول تذكُّر الشكل في الفولاذ»؟ والجواب هو: «لا». فبرغم أن التحوُّل المرتنزيتي موجود في الحالتين، فإن خصائص الانتقال في الفولاذ مختلفة عن تلك التي في الختشيات.

يتكوّن المرتنزيت في كل من الفولاذ والختشيات، حين تبريد الخليطة. وحين التسخين، يصبح المرتنزيت أمتن بالإرجاع (Tempering)، مغيّراً بنيته البلّورية في حالة الفولاذ، في حين أنه في الختشيات يعود إلى طوره الأوستنيتي الأصلي. يُعرف هذا النوع من التحوُّل في الختشيات بالتحوُّل الحراري المرن (Thermoelastic Transformation). وطَوْر الأب العالي الحرارة في الختشيات غير الحديدية هو شبكة تكعيبية ممركزة الجسم (Body Centered Cubic) (BCC) (تُعرف بالأوستنيت). وحين التبريد، يتكوَّن 24 نوعاً من المرتنزيت، ويكون المرتنزيت المتكوّن النهائي خالياً من الإجهاد، خلافاً للفولاذ، لأن المرتنزيتات تتشكّل وتنمو بطريقة ذاتية.

يبيّن الشكل 4 ـ 3 رسماً توضيحياً للسيرورات التي تحصل في مفعول تذكُّر الشكل[1]. تتشوّه مادة ختشية في طور المرتنزيت عند درجة حرارة تقل عن $M_f$، أي درجة حرارة انتهاء التحوُّل إلى المرتنزيت. يحصل التشوّه المرتنزيتي بنموّ وتقلّص شرائح المرتنزيت الإفرادية، خلافاً لما يحصل في المواد العادية حيث يحصل التشوّه بالانزلاق. حين التسخين إلى ما فوق الدرجة $A_s$، أي درجة حرارة ابتداء الأوستنيت، يبدأ المرتنزيت بالانتقال إلى طور أب أوستنيتي حيث يبدأ أيضاً استرجاع الشكل الأصلي. وفوق الدرجة $A_f$، أي

درجة حرارة انتهاء الانتقال إلى الأوستنيت، تكون المادة الختشية قد انتقلت كلياً إلى الطور الأوستنيتي، ويُسترجع الشكل الأصلي كلياً. إن ملاءمة مادة ختشية لتطبيق معيّن يعتمد على قابليتها للتخلص من مقدار كبير من الانفعال، أو توليد قوة كبيرة، في أثناء دورة تذكُّر الشكل. يحصل التخلص من الانفعال أو توليد القوة ضمن مجال حراري مميز للخليطة، أي درجة حرارة بدء الأوستنيت $A_s$، ودرجة حرارة انتهاء الانتقال إليه $A_f$. بعبارة أخرى، تحدِّد درجات حرارة الانتقال $A_s$، $A_f$، $M_s$، $M_f$ مجال التطبيقات الممكنة للمادة الختشية.

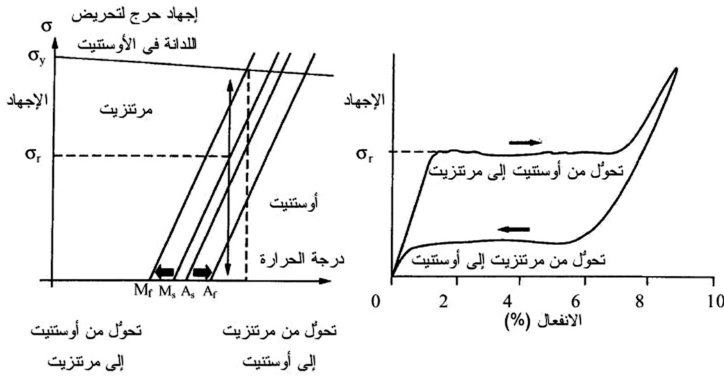



**الشكل 4 ـ 3: تمثيل شكلي لسيرورة مفعول تذكُّر الشكل**[1].

## مفعول المرونة الفائقة

يتجلى هذا المفعول، المعروف أيضاً بالمفعول شبه المرن، في تشوُّهات المادة التي تُزال عند درجة حرارة ثابتة، مولِّدةً سلوك تذكُّر الشكل الميكانيكي. وهذه الظاهرة من حيث الجوهر هي مفعول تذكُّر الشكل حرارياً نفسه، إلا أن التحوُّل إلى طور الأوستنيت $A_f$ يحصل

عند درجة حرارة تحت درجة حرارة العمل المتوقعة. فإذا شُوِّه طَور الأوستنيت بحمل خارجي، تحرَّض طَور مرتنزيتي بالإجهاد وتحصل عملية توأمة كما لو كانت المادة قد بُرِّدت إلى درجة حرارة الطَور المرتنزيتي. وحين إزالة الحمل المطبق، فإن المادة بطبيعتها تفضَّل طَور الأوستنيت عند درجة حرارة العمل، فيزول التشوّه فوراً. وتشير منحنيات التشوّه والإجهاد إلى فارق في مستوى الإجهاد في أثناء التحميل وإزالة الحمل، وهذا ما يُعرف بحلقة تباطؤ (Hysteresis) التشوّه ـ الإجهاد الفائق المرونة (انظر الشكل 4 ـ 4)[5].




**الشكل 4 ـ 4: تمثيل المرونة الفائقة. يمثل المنحني الأيمن المرونة الفائقة التي شوهدت في سلك[5].**

## منظومات خلائط تذكُّر الشكل

يُبدي كثير من المنظومات الختشية انتقالاً مرتنزيتياً. وهي مقسّمة عموماً إلى مرتنزيتات حديدية وغير حديدية. وأول من قدّم تصنيفاً للمرتنزيتات غير الحديدية هم دلسي (Delsey) وزملاؤه[8]، (انظر الجدول 4 ـ 1)، وأول من راجع الخلائط الحديدية التي تتصف

بمفعول تذكُّر الشكل هما ماكي (Maki) وتامورا[1] (Tamura) (انظر الجدول 4 ـ 2).

من بين جميع المنظومات المذكورة في الجدولين، ثمة منظومة واحدة رئيسة نجحت صناعياً، هي NiTi (X,Y)، حيث X وY هما عناصر تحل محل Ni أو Ti. والخليطة القائمة على NiTi، المعروفة بالنيتينول (Nitinol)، هي أكثر مادة استخداماً من بين جميع الختشيات المتوافرة[2].

ونورد في ما يأتي خلائط تذكُّر الشكل ذات التطبيقات الصناعية[10][11]:

- خلائط قائمة على الحديد
- خلائط قائمة على النحاس
- خلائط قائمة على النيكل والتيتانيوم
- خلائط تذكُّر الشكل العالية الحرارة
- منظومات أخرى

### الخلائط القائمة على الحديد

في الخلائط الحديدية[9][12][13]، يمكن للأوستنيت (الشبكة المكعبة الممركزة الأوجه، أو الطَور $\gamma$) أن ينتقل إلى ثلاثة أنواع من المرتنزيتات، تبعاً للتركيب أو الإجهاد: $\gamma - \alpha'$ (بنية تكعيبية ممركزة الجسم)، $\varepsilon \rightarrow \gamma$ (بنية سداسية متراصة (Hexagonal Close Packed Structure (HCP))، $\delta \leftarrow \gamma$ (بنية رباعية ممركزة الوجه (FCT) Face Centered in Type Tetragonal).

## الجدول 4 ـ 1: تصنيف المرتنزيتات غير الحديدية[8].

| المجموعة | منظومة الخليطة |
|---|---|
| 1. محاليل صلبة نهائية قائمة على عنصر له أطوار متغايرة. | 1. الكوبالت وخلائطه.<br>2. المعادن الترابية النادرة وخلائطها.<br>3. التيتانيوم والزكونيوم وخلائطهما.<br>4. المعادن القلوية وخلائطها والثاليوم.<br>5. وغيرها من قبيل خلائط البلوتونيوم والزئبق. . . |
| 2. محاليل صلبة متعدّدة المعادن ذات طَور أب من شبكة مكعبة ممركزة الجسم. | 1. أطوار بيتا-هيوم-روذري للخلائط القائمة على النحاس والفضة والذهب.<br>2. خلائط بيتا من النيكل-ألمنيوم.<br>3. خلائط نيكل-تيتانيوم-عناصر أخرى. |
| 3. خلائط انتقال من تكعيبي إلى رباعي (cubic to tetragonal transition) (ومن ضمنها أشباه المرتنزيتات). | 1. خلائط قائمة على الإنديوم.<br>2. خلائط قائمة على المنغنيز (مغنطيسية مسايرة مغنطيسية حديدية مضادة)<br>3. مركبات A15.<br>4. خلائط أخرى: RuTa، RuNb، YCu، LaCd، $LaAg_x$-$In_{1-x}$. |

## الجدول 4 ـ 2: خلائط حديدية ذات مفعول تذكُّر الشكل كلّياً أو شبه كلّي[9].

| طبيعة الانتقال | بنية المرتنزيت البلّورية | التركيب | الخليطة |
|---|---|---|---|
| م.م.ح | م.ج (α′) | ≈ 25% at Pt | Fe-Pt |
| م.م.ح | م.و (δ) | ≈ 25% at Pt | |
| م.م.ح | م.و (δ) | ≈ 30% at Pd | Fe-Pd |
| -- | م.ج (α′) | 23% Ni-10% Co-4% Ti | Fe-Ni-Co-Ti |
| م.م.ح | م.ج (α′) | 33% Ni-10% Co-4% Ti | |
| م.غ.م.ح | م.ج (α′) | 31% Ni-0.4% C | Fe-Ni-C |
| م.غ.م.ح | س.م.ر(ε) | 30% Mn-1%Si | Fe-Mn-Si |
| م.غ.م.ح | س.م.ر (ε) | 28˜33%Mn-4˜6%Si | |

**م.م.ح**: مرتنزيت مرن حراريا، **م.غ.م.ح**: مرتنزيت غير مرن حرارياً، **م.ج**: شبكة مكعبة ممركزة الجسم، **م.و**: شبكة مكعبة ممركزة الأوجه، **س.م.ر**: بنية سداسية متراصّة، **at %**: نسبة ذريّة.

صحيحٌ أن مفعول تذكُّر الشكل قد شوهد في أنواع الانتقال الثلاثة، إلا أن أكبر اهتمام بتطوير خليطة تجارية أُعطي للخلائط ذات الانتقال $\varepsilon \rightarrow \gamma$. تتصف هذه الخلائط بطاقة تصدُّع طبقي (Stacking Fault Energy) منخفضة للأوستنيت (خلائط حديد ـ كروم ـ نيكل، حديد ـ منغنيز عالي النسبة). ويحصل الانتقال من الأوستنيت إلى المرتنزيت ذي البنية السداسية المتراصة ε بانفصامات شوكلي (Schockley Dislocations) الجزئية (a/6 {112}) التي تترك شريط تصدُّع طبقي على كل مستوى أوستنيت [111] وتغيّر البنية البلّورية إلى مرتنزيتية. ويَنتُج مفعول تذكُّر الشكل، وهو من النوع الوحيد الاتجاه، في المقام الأول عن الحركة العكسية لانفصامات شوكلي الجزئية في أثناء التسخين.

وقد تم الوصول إلى مفعول تذكُّر الشكل كلّياً في البلّورات الأحادية[14][15] والبلّورات المتعدّدة[16][17] في خلائط الحديد ـ منغنيز ـ سليكون، بوجود مقادير مناسبة من المنغنيز والسليكون. وثمة تقارير عن حصول تذكُّر شكل مشوَّه بمقدار 9 في المئة في البلّورات الأحادية[15]، وبمقدار 5 في المئة في البلّورات المتعدّدة[1].

إن أي عوامل تعوق قابلية انعكاس حركة الانزلاقات سوف تؤدّي إلى استعادة غير تامة للشكل، ومن ثَمَّ إلى مفعول ضعيف لتذكُّر الشكل.

والعوامل الداخلية التي تكبح استعادة الشكل هي تركيب الخليطة، ودرجة حرارة نيل (Né el Temperature)، ودرجة حرارة الانتقال الطوري، وعيوب الشبكة البلّورية وغيرها. أما العوامل الخارجية فهي الإجهاد المطبق والانفعال والتشوّه ودرجة حرارة التطرية والمعالجة الحرارية الميكانيكية.

على سبيل المثال بيَّن موراكامي (Murakami) وزملاؤه[18] أن خليطة الحديد ـ منغنيز ـ سليكون، بنسبة 28 ـ 33 في المئة منغنيز و4 ـ 6 في المئة سليكون تتصف بمفعول مثالي لتذكُّر الشكل. إلا أنه جرى تطوير خلائط تحتوي على أقل من 20 في المئة منغنيز أيضاً. وبغية تحسين مقاومة التأكُّل في الخلائط التجارية القائمة على الحديد، يُضاف الكروم (بنسبة تقل عن 20 في المئة) والنيكل[19].

وقام ليسيز (Lecis) وليناردي (Lenardi) وساباتيني[20] (Sabatini) بتقييم مفعول طبقة سطحية منضَّبة من المنغنيز على مقاومة التآكل في ختشية حديد ـ منغنيز ـ سليكون ـ كروم. وقد فحصوا في هذا العمل خليطاً يتصف بمفعول جيد لتذكُّر الشكل ناجم عن محتوى كبير من المنغنيز (28 في المئةح). وأُضيفت نسبة من الكروم (5 في المئةح) بغية إعطاء الخليطة مقاومة جيدة للتآكل. إلا أنهم وجدوا أنه حتى في البيئات المتوسطة التآكل، فإن وجود الكروم لا يوفِّر أي حماية.

من ناحية أخرى، وجدوا أن الخليطة يمكن أن تكتسب مقاومة للتآكل بتشكيل طبقة سطحية فقيرة بالمنغنيز، وذلك بتسخين الخليطة حتى درجة حرارة عالية في الهواء (نحو 1050 مْ). تتكون هذه الطبقة المعدلة لأن المنغنيز يتأكسد انتقائياً بالنسبة إلى المكوّنات الأخرى. وتحتفظ الخليطة بقابلية هذه الطبقة للالتصاق حتى بوجود إجهاد شديد إذا لم تتجاوز سماكة المنطقة المعدّلة 20 ميكروناً. ضمن هذا الحد، لا تتأثر خصائص تذكُّر الشكل في الخليطة، وفي الوقت نفسه، تكتسب العيّنات خواص مقاومة للتآكل مقارنةً بنوع من أكثر أنواع الفولاذ الأوستنيتي غير القابل للصدأ بوجود الظروف البيئية نفسها.

يمثل هذا النوع من الختشيات المعدّلة بالأكسدة مرشَّحاً جيداً لمنظومات ختشية تتطلب مقاومة للتآكل في البيئات المتوسطة القساوة.

وفي سلسلة اختبارات أجراها تشنغ (Chung) وزملاؤه[21]، دُرِست مفاعيل التدريب الحراري الميكانيكي في الانتقال المرتنزيتي وفي تذكُّر الشكل في خليطة حديد ـ 33.7 منغنيز ـ 5.22 سليكون. وبيَّنت النتائج التجريبية أن حجم المرتنزيت الحراري كان صغيراً. وأن حجم المرتنزيت العكوس، أي المرتنزيت المتكوِّن بالتحريض الإجهادي، والذي يمكن أن يعود إلى أوستنيت بالتسخين، ازداد بمقدار يزيد على عشر مرات من حجم المرتنزيت الحراري المتحرِّض بالإجهاد عند التسخين. ووُجد أن لدرجة حرارة استرجاع الشكل مفعولاً حاسماً في حجم المرتنزيت. في التدريب الحراري الميكانيكي عند درجة حرارة استرجاع منخفضة، يتناقص حجم المرتنزيت العكوس بعد الدورة الثالثة. أما حين التدريب الحراري الميكانيكي عند درجة حرارة استرجاع بين 500 و600 مْ، فقد ازداد حجم المرتنزيت العكوس بمقدار 1.8 مرة من الحجم الذي كان للمرتنزيت المحرض بالإجهاد قبل التدريب، مع استرجاع تام للشكل تقريباً. ووُجد أن نسبة استعادة شكل الخليطة تتناسب مع حجم المرتنزيت العكوس. وقد حُدِّد ذلك بمكاملة ذُرى الاحتكاك الداخلية، بالنسبة إلى درجة الحرارة، في الانتقال المرتنزيتي العكسي.

ودرس هامرز (Hamers) ووايمان (Wayman)[22] الخلائط المتنوعة القائمة على الحديد التي تتصف بالانتقال المرتنزيتي من شبكة تكعيبية ممركزة الجسم إلى بنية سداسية متراصَّة (أي خلائط الحديد والمنغنيز). وقد تركز جهدهما الرئيس في إضافة الكوبالت، وفي مفعوله في درجات حرارة التحوّل وفي تذكُّر الشكل. وتضمنت الدراسة فحص المقاومة الكهربائية وقياسات المسح الحراري التفاضلي (Differential Scanning Calorimetry)، وقياسات مجهرية بصرية، واختبارات ضغط وحَنِي.

وكان من بين الخلائط المدروسة ما يأتي: الخليطة **أ** (70 حديد، 25 منغنيز، 5 كوبالت)، الخليطة **ب** (67 حديد، 25 منغنيز، 8 كوبالت)، الخليطة **ج** (65 حديد، 30 منغنيز، 5 كوبالت)، الخليطة **د** (62 حديد، 30 منغنيز، 8 كوبالت)[(23)] وبيّنت النتائج ما يأتي:

1 ـ كانت درجات حرارة التحوُّل التي تحدّدت بالقياس بالمسح الحراري التفاضلي، وبقياس المقاومة الكهربائية متشابهة جداً. ودلَّت القياسات على أن درجات حرارة التحوُّل تعتمد على نسبة المنغنيز، وأن إضافة الكوبالت لم يكن لها تأثير يُذكر. من ناحية أخرى، بيّنت المعالجة الحرارية الميكانيكية للعيّنات مفعولاً قوياً في درجات حرارة التحوُّل وحلقة التباطؤ.

2 ـ كانت البنية الميكرويّة، حين مقارنة الخليطتين **أ** و**ب** بالخليطتين **ج** و**د** نفسها إلى حد بعيد، وهذا ما يدل على أن درجة حرارة نيل يجب أن تكون أقل من درجة حرارة الغرفة.

3 ـ جرى في هذا العمل قياس استرجاع كبير للشكل عند إزالة الحمل في اختبار الحَنِي، وبدلاً من نقصان المرونة الفائقة عند ازدياد مفعول تذكُّر الشكل، أبدت الخلائط الحالية زيادة فيها مع ازدياد ذلك المفعول.

4 ـ جرى قياس مفعول تذكُّر الشكل باختبارات الضغط والحَنِي، وقد تبين أن مفعول تذكُّر الشكل في خلائط الحديد ـ منغنيز ـ كوبالت ضعيف نسبياً مقارنة به في خلائط الحديد ـ منغنيز ـ سليكون.

5 ـ أخيراً، بيّنت نتائج عيّنات الحَنِي من التراكيب الأربعة بوضوح أن تذكُّر الشكل يعتمد على التركيب، ويشير الفرق بين العيّنات التي لُفَّت وهي ساخنة، وتلك التي بُرِّدت بسرعة أن تذكُّر الشكل يعتمد أيضاً على المعالجة الحرارية الميكانيكية.

لم تنجح الخلائط القائمة على الحديد حتى الآن كخلائط تتذكَّر الشكل. وهي لا تُبدي إلا مفعولاً محدوداً ووحيد الاتجاه لتذكُّر الشكل

بعد معالجة حرارية ميكانيكية مستنزفة للجهد. وليس ثمة معلومات عن مفعول مزدوج الاتجاه فيها ذي قيمة، ولم تُلاحَظ فيها خواص شبيهة بالمرونة، إلا أن ما أثار بعض الاهتمام هو مقدرتها المعتدلة على تخميد الاهتزازات. لذا فإن التطبيق الناجح الوحيد لخلائط الحديد يتمثَّل بالقارنات (Couplings). يقوم هذا النوع من التطبيق على مفعول الاتجاه الواحد، حيث تكون إجهادات الاسترجاع معتدلة، لكنها كافية[23].

ودرس إيناغاكي (Inagaki)[2][19] مفعول النيكل في تذكُّر الشكل في خلائط الحديد ـ منغنيز ـ سليكون ـ كروم ـ نيكل.

### الخلائط القائمة على النحاس

تُشتق الختشيات القائمة على النحاس[24][28] من منظومات النحاس ـ زنك، والنحاس ـ ألمنيوم، والنحاس ـ قصدير. أما قيم نِسَب التركيب فتتبع طَور هيوم ـ روثري الشهير. في معظم الختشيات، يتصف هذا الطور بشبكة مكعبة ممركزة الجسم غير منتظمة عند درجات الحرارة العالية، لكنه يتحوَّل إلى منتظم بصيغة B2 أو $DO_3$ أو $L2_1$ عند درجات الحرارة المنخفضة. ويُبدي ثابت مرونة القص (Shear Elastic Constant) للطَور $\beta$ سلوكاً شاذاً مع انخفاض درجة الحرارة، أي إنه ينخفض إلى أن يُحوِّل عدم استقرار الشبكة البلّورية بالنسبة إلى القطع (110) $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ عند درجة حرارة ما الطور $\beta$ إلى مرتنزيت. وتختلف درجة حرارة بدء الانتقال إلى مرتنزيت، $M_s$، باختلاف تركيب الخليطة. واللاتناحي المرن للطَور $\beta$ أشدّ كثيراً منه في المعادن والخلائط العادية، ويتزايد على نحو أشدّ مع الاقتراب من نهاية التحوُّل المرتنزيتي.

ثمة ثلاثة أنواع لمرتنزيتات النحاس ـ زنك والنحاس ـ ألمنيوم هي: $\alpha'$ أو $\beta'$ أو $\gamma'$، مع أدلة سفلية 1 أو 2 أو 3 تُضاف إلى الدلالة على طرائق الترتيب في الطور بيتا ($\beta$)، أي: (2) لـ B2 و(1) لـ $DO_3$

أو (3) لـ $L2_1$. ويمكن أيضاً أن يحصل بعض الانتقال من بنية مرتنزيتية إلى أخرى (من قبيل $\beta' \rightarrow \gamma'$). وتكون النتيجة الصافية اندماج صفائح في مجموعات ذاتية التكيُّف، وحتى اندماج للمجموعات. ويحوِّل تسخين هذه البنية المرتنزيتية المشوّهة إلى الطَور بيتا مع مفعول لتذكُّر الشكل مرافق للتغيّر البنيوي.

تُشتق الختشيات القائمة على النحاس، والمستخدمة حالياً في التطبيقات، من منظومات النحاس ـ زنك والنحاس ـ ألمنيوم بإضافة عناصر لأسباب تعدينية مختلفة. والمرتنزيتات العاملة في هذه الخلائط هي من الأنواع $\beta_1$، أو $\beta_2$ أو $\beta_3$ فقط، أو تكون هذه الأنواع هي المهيمنة فيها مع قليل من المرتنزيت $\gamma'$.

حين انتقاء تركيب الخليطة، بغية الحصول على بنية ميكرويّة كاملة للطَور بيتا تتحوَّل إلى مرتنزيت، يجب أخذ معيارين في الحسبان: **(1)** يجب أن يكون الطَور بيتا مستقراً على أوسع مجال حراري ممكن. لأنه كلما كان هذا المجال أضيق، كانت ثمة حاجة إلى معدّل تبريد أسرع لدرء تفكُّك الطَور بيتا. **(2)** يجب أن تقع درجات حرارة التحوُّل الطوري ضمن مجال يحقق متطلبات تطبيق تذكُّر الشكل (من ـ 150 حتى 200 مْ). إن منظومات الخلائط الثلاث المذكورة في الجدول 4 ـ 3 تحقّق هذين المعيارين، وهي في قيد الاستخدام الآن، لكن بمقادير محدودة.

## درجات حرارة التحويل/ السريع

لا تتأثر درجات حرارة التحوُّل الطَوري بتركيب الخليطة فقط، بل تتأثر جداً بعوامل أخرى أيضاً.

## تأثير التركيب

حاول باحثون كثر وضع علاقة كمية بين نسب مكوِّنات الخليطة

ودرجة حرارة بدء الانتقال المرتنزيتي $M_s$ لعدد من الخلائط القائمة على النحاس. وثمة نظرة إجمالية إلى الموضوع في المرجع 25. ويعطي الباحثون المختلفون أهمية مختلفة للعنصر نفسه. ويكمن السبب الرئيس لهذا الاختلاف في أن القياسات أُجريت على عيّنات لها تواريخ حرارية ميكانيكية مختلفة (أي يُحتمل أن القياسات لم تُجرَ على عيّنات متماثلة). وفعلاً، ليست نسب التركيب العامل الكيميائي الوحيد الذي يؤثّر في $M_s$. إن نوع ودرجة انتظام شبكة بيتا والمرتنزيت يؤثّران أيضاً في $M_s$. لذا يمكن للمعالجة الحرارية أن تؤثّر في درجة حرارة التحوُّل.

إن درجات حرارة التحوُّل الطَوري للخلائط القائمة على النحاس شديدة الحساسية للتغيّرات الضئيلة في درجة انتظام الطَور بيتا. ويمكن لهذه التغيّرات أن تحصل بسهولة بالتبريد من درجات الحرارة المتوسطة والعالية، حيث تظهر على شكل عدم انتظام خفيف في مادة كانت سابقاً جيدة الانتظام. وهذا المفعول واضح في كل من الخلائط القائمة على النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم[29] والنحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل [30][32]، ويتجلى على شكل كبت للتحوُّل الطَوري، وبذلك يستقر الطَور بيتا بالنسبة إلى المرتنزيت.

وبيَّنت الدراسات التي أجراها كاينوما (Kainuma) وتاكاهاشي (Takahashi) وإيشيدا[33] (Ishida) أن خلائط تذكُّر الشكل المطاوعة القائمة على النحاس ـ ألمنيوم ـ منغنيز قد طُوِّرت بالتحكّم في درجة الانتظام في الطَور بيتا. فإضافةُ المنغنيز إلى الخليطة الثنائية نحاس ـ ألمنيوم تجعل الطَور بيتا مستقرّاً، وتوسِّع منطقة الطَور المفرد إلى درجات حرارة أخفض، وإلى نسبة ألمنيوم أقل. وقد أُثبت أن خلائط النحاس ـ ألمنيوم ـ منغنيز ذات نسبة الألمنيوم القليلة تتصف إما ببنية A2 غير منتظمة، أو ببنية $L2_1$ منتظمة مع درجة انتظام أخفض، وأنها تتصف بمطاوعة ممتازة.

**الجدول 4 ـ 3**: خلائط صناعية قائمة على النحاس.

| الخليطة الأساسية | التركيب (في المئة) | درجة حرارة بدء التحوُّل المرتنزيتي (مْ) | حلقة التباطؤ (مْ) | عناصر الخليطة الأخرى (في المئة) | عناصر تنعيم الحُبيْبات الحالية التي تُنتِج رواسب | ملاحظات عن الخليطة الأساسية |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Cu-Zn-Al | 5-30 Zn<br>4-8 Al | -190 - +100 | 10 (β′) | Ni (-5%)<br>Mn (-12%) | Co (CoAl); B($AlB_2$);<br>Zr(?); B, Cr ($Cr_xB_y$) | جيدة قابلية السحب وتكرارية المواصفات |
| Cu-Al-Ni | 11-14.5 Al<br>3-5 Ni | -140 - +200 | 10 (β′)<br>40 (γ′) | Mn (-5%) | Ti $(Cu, Ni)_2$ TiAl);<br>B ($AlB_{12}$); Zr (?) | نزوع إلى استقرار المرتنزيت<br>استقرار بيتا ضعيف (فوق 200 مْ)<br>مطاوعة منخفضة |
| Cu-Al-Be | 9-12 Al<br>0.4-1 Be | -80 - +80 | 6(β′) | Ni (-5%) | B ($AlB_2$ or $AlB_{12}$)<br>Ti ($Cu_2TiAl$) | استقرار مرتنزيتي ضعيف<br>استقرار بيتا جيد<br>تكرار مواصفات سيئ<br>استقرار بيتا ممتاز (فوق 200 مْ) |

وأبدى الطَور بيتا الأب للخلائط (14 في المئة ذريّة نحاس ـ 13 في المئة ذريّة ألمنيوم ـ منغنيز) في أثناء التبريد السريع (Quenching) والتعتيق (Aging) البنية غير المنتظمة A2 للطور بيتا، وأبدى ذاك الذي للخلائط (17 في المئة ذريّة نحاس ـ 10 في المئة ذريّة ألمنيوم ـ منغنيز) البنية المنتظمة $\beta_1(L2_1)$. وفي حالة الخلائط (16 في المئة ذريّة نحاس ـ 10 في المئة ذريّة ألمنيوم ـ منغنيز)، فإن الطَور بيتا الذي نتج بالتبريد يتحوّل إلى $\beta_1$ في أثناء التعتيق عند 150 مْ. وقد أبدت هذه الخلائط مطاوعة ممتازة للمطّ بالشدّ بمقدار يصل حتى 15 في المئة، وبقابلية تشغيل بارد تزيد على 65 في المئة، وكان هذا بالدرجة الأولى بسبب انخفاض درجة الانتظام في الطَور بيتا[33].

ومن الاستقصاءات الأخرى التقييمات التي أجراها كسياو (Xiao) وجوهري[34] (Johari) للاحتكاك الداخلي في خلائط تذكُّر الشكل القائمة على النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم في حالات البنية الميكرويّة المختلفة في مجال واسع من مطال الإجهاد. وقد بيَّن القياس الآني لتغيّر الشكل الناجم عن الإجهاد وجود ترابطات بين الاحتكاك الداخلي وآليات التشوُّه. ووجد الباحثان أن اعتماد الاحتكاك الداخلي على مطال الإجهاد المُشاهد لا يمكن أن يُمثَّل بصيغة واحدة، بل ثمة صيغ منفصلة تُطبَّق في مجالات مطال الإجهاد المختلفة حيث تكون آليات الاحتكاك الداخلي مختلفة.

واستقصى وي (Wei) وبنغ (Peng) وزو (Zou) وينغ[35] (Yang) مفاعيل التعتيق الثابت الحرارة في المجال 250 حتى 400 مْ في خليطة تتذكَّر الشكل ذات نسب وزنية (نحاس ـ 11.88 في المئة ألمنيوم ـ 5.06 في المئة نيكل ـ 1.65 في المئة منغنيز ـ 0.9 في المئة تيتانيوم) في أثناء تبريدها.

ووجدوا في أثناء تعتيق الطَور الأب عند درجات حرارة متوسطة أن الخليطة الخماسية نحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل ـ منغنيز ـ تيتانيوم أكثر

تأثراً بمفاعيل التعتيق من الخلائط الثلاثية نحاس - ألمنيوم ـ نيكل. وتُبدي الختشيات في أثناء سقايتها ثلاث مراحل على الأقل من التطورات البنيوية الميكرويّة التي تعتمد على درجة الحرارة والتي توافق التغيّرات المختلفة في خواص وأداء الخليطة.

ودرس روميو[36] (Romeo) وزملاؤه تركيز وطبيعة العيوب الناجمة عن التبريد السريع من درجات حرارة مختلفة $T_q$ وتأثيرها في التحوّل المرتنزيتي الذي تعرضت له ختشية نحاس - ألمنيوم ـ بيريليوم.

## تأثير عناصر تنعيم الحُبَيبات التي تشكل رواسب

تتصف الختشيات القائمة على النحاس بنمو حُبَيبي سريع عند درجات حرارة أعلى من درجات حرارة ذوبانها. ونظراً إلى كون حجم الحُبيبة من رتبة الميليمتر، وإلى اللاتناحي الشديد في مرونة الطَور بيتا، تعاني الحُبيبات التكسُّر في أثناء التبريد السريع والتشوُّه اللّدن. وقد حُلَّت المشكلة بإضافة عناصر تنعيم للحُبيْبات إلى ختشيتين. فقد أضيفت 0.4 ـ 1.2 في المئة زركونيوم، و0.4 ـ 0.8 في المئة كوبالت، و0.5 ـ 1.0 في المئة تيتانيوم، و0.4 ـ 1.2 في المئة بورون إلى خلائط نحاس - زنك ـ ألمنيوم لتقليص أحجام الحُبيْبات إلى مستوى 100 ميكرون. إلا أن التيتانيوم هو أكفأ عنصر تقريباً في تنعيم حجم الحُبيْبة في الخلائط نحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل حتى مستوى 100 ميكرون[37][38].

يحصل التنعيم بتكوُّن جُسيْمات غير قابلة للذوبان تساعد على تنوِّي الحُبيْبات أو تعوّق نموّها. وللعناصر المنعِّمة للحُبيْبات أربعة مفاعيل مباشرة وغير مباشرة في درجة حرارة التحوُّل الطَوري: **(1)** بتشكيلها لبُنية متعدّدة المعادن تمنع شبكة بيتا الأصلية من خلط العناصر، وهذا يغيّر درجات حرارة الانتقال الطَوري وفقاً للصيغ المعطاة في الجدول 4 ـ 4. **(2)** يبقى جزء من هذه العناصر في حالة ذوبان ضمن حاضنة بيتا. واعتماداً على حجم الذرّة، يمكن لهذا أن يؤدّي إلى تقسية

المحلول الصلب، وهذا يخفِّض درجة حرارة بدء التحوُّل المرتنزيتي $M_S$، وفي النهاية، درجات حرارة الانتقال الأخرى[40] **(3)** ويمكن أيضاً أن يكون لها إسهامات كيميائية. **(4)** والرواسب أساساً تحدّ من نمو الحُبيْبات في أثناء التطرية، وهذا له تأثير في درجات حرارة الانتقال وفقاً لما سوف نناقشه في المقطع التالي.

### تأثير مقاس الحُبَيْبة

بيَّن عدة باحثين أن الحُبيْبة الصغيرة الحجم تؤدّي إلى استقرار الطَور الأب بتخفيض درجات حرارة التحويل حتى 40 مْ[41][42]. وقد لوحظ هذا المفعول في خلائط توجد، أو لا توجد، فيها عناصر تنعيم الحُبيبات، وهذا يشير إلى تأثير المفعول الكابح الذي يتصف به حجم الحُبيْبة نفسه في التحوُّل الطَوري. إن انخفاض درجة حرارة التحوُّل يُعزى إلى زيادة كبح الحُبيْبات مع نقصان حجم الحُبيبة. وهذا هو الاستنتاج الذي توصّل إليه معظم الباحثين[43][44]. لذا فإن العناصر التي تُسهم في طاقة التصدّع الطبقي العالية سوف يكون لها مفعول كمفعول مقاس الحُبيْبة الصغير.

### تأثير العيوب

غالباً لا يكون تأثير حجم الحُبيْبة، أو تأثير نسبة حجم الحُبيْبة إلى سماكتها، هو وحده ما يُفسِّر تغيّرات درجات حرارة الانتقال الطَوري. فتطرية عيّنة عند درجات حرارة عالية يمكن أن يؤدّي إلى نموّ الحُبيْبات، إلا أنه سوف يُخفِّض مقدار العيوب أيضاً، ومن ثَمَّ مواقع تشكل النوى. في الخلائط القائمة على النحاس، تتعقَّد الحالة ثانية بالفراغات المتولِّدة من التبريد السريع وبأحجام نطاقات الأطوار المضادة (Antiphase) التي يمكن أيضاً اعتبارها مقوية للحاضنة. إن زيادة طاقة الطَور بيتا الناجمة عن تركيز أشدّ لعيوب من قبيل العناصر

الغريبة في المحلول الصلب والرواسب وحقول التشوّه الداخلية (انفعالات الترابط) تؤدّي إلى تخفيض الـ $M_s$[44]. أكثر من هذا، إذا كانت كثافة العيوب متناسبة مع مواقع تكوُّن النوى، فإن كثافة العيوب العالية سوف تعطي صفيحات مرتنزيتية أصغر كثيراً.

## الجدول 4 ـ 4: خلائط تذكُّر الشكل عالية الحرارة[39].

| المنظومة الأساسية | نوع المرتنزيت | عناصر الخلط الأخرى | | درجة حرارة بدء الأوستنيت $A_S$ |
|---|---|---|---|---|
| | | الاسم | السبب | |
| Fe-Mn-Si | ليس مرناً حرارياً ε γ | Co, Ni, Cr | لتحسين مقاومة التآكل | 150 ـ 200 مْ |
| Cu-Al-Ni | مرن حرارياً 18 $\beta_1$ R (2H) | Mn,Ti, B, Zn | لتحسين التشغيل الميكانيكي، التحكّم في درجات حرارة التحوُّل الطَوري، تنعيم الحُبيبات لتحسين المطاوعة | 100 ـ 200 مْ |
| (Ni-X)Ti | مرن حرارياً $B_2$ B19, B19 | X-Pt, Pd, Au, Rh B | بناء على اتصاف المركبات B2-TiX المتعدّدة المعادن بالانتقال طوري التحوُّل عند درجات حرارة عالية جداً. لتقليص حجم الحُبيبة وتحسين مقاومة الشدّ | 150 ـ 500 مْ |
| Ni(Ti-X) | مرن حرارياً B19, B19 | X= Hf, Zr | بناء على تشكيل المركبات NiX المتعدّدة المعادن شبه ثنائي مع الـ NiTi | 120 ـ 350 مْ |
| Ni-Al | مرن حرارياً 3R $B_2$ (7R) (بنية L10) | Cu, Co, Ag Fe, Co, Mn, B | لزيادة درجات حرارة التحوُّل الطَوري. تحسين المطاوعة | 100 ـ 600 مْ |
| Ni-Mn | مرن حرارياً (؟) B20 (بنية L10) | Al, Ti, Cu للـ Ni Mg, Al, Si, Ti, V,Sn, Cr,Co,Fe, Mo للـ Mn | لإنقاص $M_s$ وتحسين خصائص تذكُّر الشكل. لزيادة $M_f$ وتحسين خصائص تذكُّر الشكل | 500 ـ 750 مْ |
| بنية متعدّدة المعادن قائمة على Zr | B19 وحيد الميل | Ti, Ni | لتحسين المطاوعة | 200 ـ 900 مْ |
| CuZr | غير مرن حرارياً | | | |
| $Zr_2CuNi$ | غير مرن حرارياً | | | |
| $Zr_2CuCo$ | مرن حرارياً | | | |

ويمكن أيضاً إدخال تشكيلات عيوب معيّنة بالتعريض للدورة الحرارية، وبالتدريب على تذكُّر الشكل المزدوج الاتجاه أيضاً[45]. وقد اقتُرحت الطبيعة المتغيرة للانفصام نفسه، في الطَور بيتا والطَور المرتنزيتي، لتعديل استقرار الطَور النسبي لكل من الطَورين.

## خلائط النيكل والتيتانيوم

تُعدُّ الخليطة 50 في المئة نيكل ـ 50 في المئة تيتانيوم أفضل خلائط تذكُّر الشكل استقصاء، وهي تحتل تقريباً سوق الختشيات برمتها. إنها طَور متعدّد المعدن يتصف ببعض الانحلال عند درجات الحرارة العالية. وعلم وتقانة خلائط النيكل - تيتانيوم موثّقان توثيقاً واسع النطاق. وتأثير التركيب والمعالجة الحرارية الميكانيكية في الخواص الوظيفية مفهومان جيداً وموثّقان في المنشورات. لذا لن نقتبس إلا من بعض المنشورات المهمة[46][50].

الغرض الأساسي من معالجة خلائط النيكل ـ تيتانيوم هو أن المرتنزيت والطَور بيتا يجب أن يُقوَّيا بغية درء التشوّه اللّدن في أثناء التحميل شبه المرن، أو التحميل الذي يرافقه تذكُّر الشكل. ويتحقَّق هذا بالطرائق العادية: التقسية الانفعالية أو التقسية بالتشويه (Strain hardening) في أثناء التشوّه البارد، التقسية بالمحلول (Solution hardening)، والتقسية بالترسيب أو التعتيق (Precipitation hardening). وتتصف خلائط النيكل ـ تيتانيوم بميزة مهمة هي إمكان تطبيق هذه التقنيات عليها بسهولة بسبب مطاوعتها الممتازة، وبسبب سيرورة الترسيب المثيرة جداً، لكن المعقّدة[51].

تقع نسب تركيب ختشيات النيكل ـ تيتانيوم تقريباً بين 48 و52 في المئةذ من النيكل. أما درجات حرارة انتقال البنية B2 إلى الطَور المرتنزيتي B19′ ذي البنية الأحادية الميل، فهي شديدة الحساسية لنسبة النيكل (تنخفض درجة الحرارة بنحو 150 درجة عند زيادة

النيكل بمقدار 1 في المئةذ). ويمكن اختيار درجات حرارة التحوُّل الطَوري لتكون بين 40 ـ و100+ مْ.

ومن بين جميع الختشيات، تُبدي خلائط النيكل ـ تيتانيوم أفضل سلوك لتذكُّر الشكل. حتى في حالة تعدّد البلّورات، فإن استعادة تشوُّه مقداره 8 في المئة ممكنة، والتشوُّه شبه المرن بمقدار 8 في المئة قابل للانعكاس كلّياً عند درجة حرارة تقع فوق درجة انتهاء التحوُّل إلى الطَور الأوستنيتي $A_f$، في حين أن إجهاد استعادة الشكل هو من رتبة الـ 800 ميغا باسكال.

إن أكثر خاصية مميزة لانتقال الطَور R - Phase التي تؤثّر في بعض خلائط النيكل ـ تيتانيوم هي أنها تُبدي مفعولَي تذكُّر للشكل واضحين، وحيد الاتجاه وثنائي الاتجاه، يتصفان بمقدرة على عكس تشوّه من رتبة 1 في المئة، وأن حلقة تباطؤ الانتقال صغيرة جداً ولا تزيد على بضع درجات، وهذا ما يعطي إمكان التحكّم بالتجهيزات بدقة.

وتجب الإشارة إلى أن المزيد من التبريد ينقل الطَور R إلى المرتنزيت B19′. وأثناء التسخين، لا يُشاهد إلا الانتقال المرتنزيتي العكسي. ولمشاهدة الانتقال العكسي للطور R، يجب إيقاف التبريد عند درجة حرارة أعلى من $M_s$.

وقد أُثبت أن ظهور الطَور R يعتمد على نسب التركيب، وعلى عناصر الخليطة والمعالجة الحرارية الميكانيكية[50]. وفي الواقع، النقطة الرئيسة المشتركة هي أن جميع المفاعيل التي تكبت الانتقال المرتنزيتي الأمامي عند درجات تقل عن درجة حرارة الغرفة سوف تفضّل ظهور الانتقال إلى الطَور R المستقر تماماً عند نحو 30 مْ.

بغية إيضاح الخواص الميكانيكية لخلائط النيكل ـ تيتانيوم، يتضمن الجدول 4 ـ 5 مقارنة بين تلك الخلائط والفولاذ. تمتلك خلائط النيكل ـ تيتانيوم خواص مفيدة أخرى أيضاً من قبيل مقاومة الاهتراء[56] ومقاومة التآكل الجيدة. يُضاف إلى ذلك أن خلائط النيكل ـ تيتانيوم تمتلك انتقالاً

إضافياً شبيهاً بالانتقال المرتنزيتي، أي ما يُسمّى بانتقال الطَور R[52][53][57]. إن الانتقال R هو تحويل →←B2 معيَّني ذو خصائص من الدرجة الثانية أيضاً[52]. يظهر انتقال الطَور R حين التبريد قبل الانتقال المرتنزيتي ضمن ظروف معيّنة لتصنيع المادة ومعالجتها. ولهذا الطَور حلقة تباطؤ ضيقة (1.5 مْ تقريباً)، واستقرار دورات حرارية جيد جداً. ولهذه الأسباب، استُخدم الطَور R في كثير من تطبيقات المفعِّلات. إلا أن مجال الانفعال فيه صغير نسبياً (نحو 1 في المئة).

**الجدول 4 ـ 5: الخواص الميكانيكية لخلائط النيكل ـ تيتانيوم مقابل خواص الفولاذ غير القابل للصدأ[a]**

| | خليطة نيكل ـ تيتانيوم | بيانات شائعة عن الفولاذ غير القابل للصدأ |
|---|---|---|
| التشوّه المرن العظيم القابل للانعكاس | 8 % | 0.8 في المئة |
| كثافة الكتلة | عادة 6450 كغ/م$^3$ | 7850 كغ/م$^3$ |
| معامل يونغ | م: 28 ـ 41 جيغا باسكال<br>أ: 83 جيغا باسكال | 190 ـ 210 جيغا باسكال |
| معامل القص | م: 15.5 − 10 جيغا باسكال<br>أ: 31 جيغا باسكال | 75−80 جيغا باسكال |
| نسبة بواسان | 0.33 | 0.27 ـ 0.30 |
| إجهاد الخضوع♠ | أ: 690 ـ 195 ميغا باسكال<br>م: 70140 ميغا باسكال | 1600− 400 ميغا باسكال♥ |
| الإجهاد الأقصى | 895−1900 ميغا باسكال | 700−1900 ميغا باسكال |
| عامل التمدّد الحراري | أ: 11 × $10^{-6}$/مْ<br>م: 6.6 × $10^{-6}$/مْ | 8 ـ 10 × $10^{-6}$/مْ |

أ: أوستنيت، م: مرتنزيت.

بيانات النيكل ـ تيتانيوم مأخوذة من المرجعين 53 و54، وبيانات الفولاذ مأخوذة من المرجع 55.

♠ ليس إجهاد الخضوع في خلائط تذكُّر الشكل في الحقيقة إجهاد خضوع، بل إجهاد حرج يحرِّض المرتنزيت عندما تكون الخليطة في حالة الأوستنيت، وإجهاد حرج لإعادة توجيه المتغيّرات المرتنزيتية عندما تكون الخليطة في الحالة المرتنزيتية.

♥ تنطبق هذه القيم عادة على الفولاذ النابضي.

## تأثير معدل الانفعال في التشوُّه

أجرى لين (Lin) وزملاؤه[58] اختبارات شدّ لأسلاك ختشية من النيكل ـ تيتانيوم بالتحميل وإزالة التحميل بمعدّلات انفعال مختلفة عند درجات حرارة ثابتة مختلفة، واستقصوا تأثير معدل الانفعال في العلاقة بين الإجهاد والانفعال ودرجة الحرارة. وفي ما يلي ملخص للنتائج الرئيسة:

**(1)** عند معدل انفعال $\varepsilon' < 10$ في المئة/ دقيقة، لم يعتمد إجهاد التحوُّل المرتنزيتي وإجهاد التحوُّل المرتنزيتي العكسي على $\varepsilon'$. وكان هذان الإجهادان ثابتين تقريباً في مناطق التحوُّل. **(2)** عند معدّلات انفعال $\varepsilon' \geqslant 10$ في المئة/ دقيقة، ازداد إجهاد التحول المرتنزيتي، وانخفض إجهاد التحول المعاكس، مع ازدياد $\varepsilon'$. **(3)** كان تأثير $\varepsilon'$ في إجهاد التحوُّل الناجم عن انتقال الطَور R منخفضاً. **(4)** اعتمدت كثافة طاقة الانفعال القابل للاستعادة قليلاً على $\varepsilon'$، لكنها ازدادت ازدياداً متناسباً مع درجة الحرارة. واعتمدت كثافة طاقة الانفعال المبددة على الحرارة قليلاً، لكنها تزايدت متناسبة مع $\varepsilon'$ من أجل $\varepsilon' \geqslant 1$ في المئة/ دقيقة. (5) إن تأثير $\varepsilon'$ في خواص التشوُّه مهم في تقييم الخواص الميكانيكية للعناصر الختشية.

## منظومات خلائط النيكل ـ تيتانيوم الثلاثية

تفتح إضافة عنصر ثالث إلى الخليطة الثنائية نيكل ـ تيتانيوم مزيداً من الإمكانات لتكييف تلك الخلائط مع متطلبات تطبيقات أكثر تحديداً. إن إضافة عنصر ثالث ينطوي على استبدال نسبي للنيكل أو التيتانيوم. لذا تجب الإشارة دائماً بوضوح إلى الذرّات (ذرّة النيكل أم ذرّة التيتانيوم أم كليهما) التي حل محلها العنصر الثالث.

لا يؤثّر الخلط مع عنصر ثالث في درجات حرارة التحوُّل

الطَوري فحسب، بل سيكون له تأثير أيضاً في حلقة التباطؤ ومقاومة الشدّ والمطاوعة وخصائص تذكُّر الشكل، وفي السلسلة $B2 \rightarrow (R) \rightarrow B19'$ أيضاً. وقد سبق وصف تأثير عناصر عدة منها[59][63].

**من الناحية التطبيقية، يمكن تمييز أربعة أغراض لإضافة عنصر ثالث:**

**1** ـ تصغير حلقة التباطؤ (بالنحاس) أو تكبيرها (بالنيوبيوم).

**2** ـ تخفيض درجات حرارة التحوُّل (بالحديد أو الكروم أو الكوبالت أو الألمنيوم).

**3** ـ زيادة درجات حرارة التحوُّل (بالهافنيوم أو الزركونيوم أو البالاديوم أو البلاتين أو الذهب).

**4** ـ تقوية الحاضنة (بالموليبدن أو التنغستين أو الأُكسجين أو الكربون).

وقد طُوِّرت بعض الخلائط الثلاثية لتطبيقات واسعة النطاق.

## نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس

تُعتبر الخلائط الثلاثية نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس، التي يحل فيها النحاس محل النيكل، على القدر نفسه من الأهمية كالخليطة الثنائية نيكل ـ تيتانيوم. فزيادة نسبة النحاس تخفض إجهاد التشوّه في الحالة المرتنزيتية وتقلِّص أيضاً حلقة التباطؤ شبه المرنة من دون أن تؤثّر تأثيراً ملحوظاً في درجة الحرارة $M_s$[64]. إلا أن إضافة أكثر من 10 في المئة من النحاس يجعل الخليطة هشة، وهذا ما يعوّق قابلية تشكيلها.

وفي حين أن التيتانيوم ـ نيكل ينتقل من الطَور B2 إلى طَور أحادي الميل، فإنه يجب الانتباه أيضاً إلى أن خليطة التيتانيوم ـ نيكل

ـ نحاس التي تتجاوز فيها نسبة النحاس 15 في المئة ذ تنتقل من الطَور B2 إلى طَور متوازي المستطيلات (Orthorhombic). أما خليطة التيتانيوم ـ نيكل ـ نحاس التي تقل فيها نسبة النحاس عن 15 في المئة ذ، فيحصل فيها الانتقال على مرحلتين[1].

من عيوب خلائط التيتانيوم ـ نيكل ـ نحاس أن درجات حرارة الانتقال الطَوري لا تنخفض إلى ما دون درجة حرارة الغرفة. لذا، وبغية الحصول على خلائط شبه مرنة عند درجة حرارة الغرفة لها حلقة تباطؤ ضيقة، يمكن إضافة الكروم أو الحديد أيضاً. بناءً على ذلك، طُوِّرت خليطة من 39.8 نيكل ـ 49.8 تيتانيوم ـ 10 نحاس ـ 0.4 كروم لها حلقة تباطؤ ضيقة (130 ميغا باسكال)، تساوي ربع تلك التي للخليطة 50 في المئة نيكل ـ 50 في المئة تيتانيوم، ودرجة حرارة $M_s$ تحت درجة حرارة الغرفة.

## تيتانيوم ـ نيكل ـ نيوبيوم

إن حلقة تباطؤ التحوُّل المتأصلة في النيكل ـ تيتانيوم ـ نيوبيوم أكبر من تلك التي للخليطة الثنائية نيكل ـ تيتانيوم[66][67]. وبوجود جزء كبير حجمياً من جُسيْمات النيوبيوم β القابلة للتشوّه، يمكن زيادة عرض الحلقة بتشويه زائد للمرتنزيت المحرّض بالإجهاد، عند درجة حرارة بين $M_s$ و$M_d$ (أوستنيت تام) عموماً. في الأصل، طوِّرت الخليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ نيوبيوم (بالتحديد 47 نيكل ـ 44 تيتانيوم ـ 9 نيوبيوم) لدى شركة .Raychem Corp لاستخدامها في تجهيزات القمط. فالانزياح الكبير لدرجات حرارة الانتقال الطَوري العكسي من قيم تقل عن درجة حرارة الغرفة إلى قيم أعلى منها، الناجم عن التشوّه، يمكِّن من خزن الأجزاء المقموطة عند درجة حرارة الغرفة.

وطُوِّرت أيضاً في وقت لاحق خلائط نيكل ـ تيتانيوم ـ نيوبيوم تختلف عن الخلائط الثنائية بثلاثة فوارق مهمة هي[67]:

- معدل الإجهاد فيها أدنى كثيراً.
- الإجهادات $\sigma^{P-M}$ أعلى كثيراً.
- نافذة المرونة الفائقة أعرض كثيراً.

## نيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم

بيَّنت دراسات قام بها بو وتسنغ وَوُو[68] أن:

**1** ـ درجات حرارة التحوُّل الطَوري ترتفع حينما تكون نسبة الزركونيوم أكبر من 10 في المئة ذ. إلا أن الإضافة الأولية للزركونيوم تخفِّض درجات حرارة الانتقال.

**2** ـ تتصف خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم باستقرار ضعيف في أثناء الدورات الحرارية مقارنة بخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم أو النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم.

**3** ـ يتناقص الانفعال العكوس تماماً تدريجياً مع تزايد نسبة الزركونيوم. ومقارنة بالختشيات العالية الحرارة نيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم أو نيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم، فإن خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم تتصف بمفعول ختشي ضعيف. لذا ثمة حاجة إلى مزيد من التعديلات في مفعول تذكُّر الشكل والمطاوعة والاستقرار.

**4** ـ تحتاج الآلية التي تؤثّر في استقرار خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم في أثناء التعريض للدورة الحرارية إلى مزيد من الدراسة على نحو يجعل هذا العامل لا يحد من إمكان استخدام هذه الخليطة العالية الحرارة في التطبيقات الصناعية.

**5** ـ تُبدي الخلائط القائمة على النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم

مفعولاً ختشياً كاملاً حتى مع نسبة من الزركونيوم تساوي 20 في المئة ذ. إلا أن الانفعال العكوس تماماً لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم أقل كثيراً من ذاك الذي لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم عند درجات حرارة التحوُّل الطَوري نفسها. وقد أبدت خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ زركونيوم أيضاً مفعولاً ختشياً مزدوج الاتجاه بعد تدريب حراري ميكانيكي مناسب.

### نيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم

تُعدُّ خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم مواد واعدة بوصفها ختشيات عالية الحرارة، إلا أن ثمة كثيراً من المشاكل التي يجب معالجتها قبل وصولها إلى الاستخدام العملي.

أجرى وُو[69] دراسات تفصيلية لاستقصاء الاستقرار الحراري الميكانيكي لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم العالية الحرارة. وبغية المقارنة بينها وبين الختشيات الثنائية نيكل ـ تيتانيوم المنخفضة الحرارة، استخدم أيضاً مجموعة من خلائط النيكل ـ تيتانيوم الثنائية بتراكيب مختلفة لدراسة استقرارها الحراري الميكانيكي. فوجد أن تغيّر درجة حرارة التحوُّل الطَوري للخلائط نيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم، بعد 1000 دورة حرارية، قد تناقص مع تزايد نسبة البالاديوم. وبالمقارنة بخلائط النيكل ـ تيتانيوم الثنائية، فإن خليطة النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم اتصفت باستقرار أفضل كثيراً. فعلى سبيل المثال، بلغ تغيّر درجة حرارة التحوُّل لخليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ 30 في المئة ذ بالاديوم بعد 1000 دورة حرارية 2 مْ، في حين أن التغيّر في الخليطة نيكل ـ 50 في المئة ذ تيتانيوم بلغ 30 مْ.

وانبثقت عن هذا البحث نظرية جديدة سمِّيت **نموذج الانفصام الترموديناميكي** (Dislocation Thermodynamic Model)، لوصف

تحقيق استقرار الدورات الحرارية الميكانيكية للختشيات. إن هذه النظرية الجديدة توسع النظرية القديمة لتتحقّق مفاعيل الدورات الحرارية للختشيات بنجاح. لا يوفّر نموذج الانفصام الترموديناميكي فهماً لمفعول الدورات الحرارية للختشيات فحسب، وهو واحد من أكثر ظواهرها أهمية، بل يوفّر أيضاً أساليب عملية متنوعة لتحسين استقرار الختشيات العالية الحرارة. لقد وفرت نتيجة هذا البحث قاعدة بيانات أساسية غنية ممنهجة تجعل تصاميم وتطبيقات ختشيات النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم العالية الحرارة ممكنة.

## نيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم

صحيحٌ أن خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم تتصف بدرجات حرارة انتقال طوري عالية وبمفعول ختشي جيد، إلا أنها غالية جداً بسبب غلاء عنصر البالاديوم. لذا كان من الضروري متابعة البحث عن مواد اقتصادية لها خواص مشابهة لخواص تلك الخلائط.

وقد بيّنت دراسات أولية[69] أن درجة حرارة الانتقال الطَوري لخلائط النيكل ـ تيتانيوم تزداد عندما يُستعاض عن جزء من التيتانيوم بالهافنيوم أو الزركونيوم. ونظراً إلى أن ثمن عنصر الهافنيوم الخام يساوي سُدس ثمن البالاديوم، فإن ثمة مبرراً لتوقُّع أن تكون خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم أكثر اقتصادية من خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم. لذا حظي تطوير خلائط ختشية عالية الحرارة من النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم باهتمام خاص.

وبعد ثلاث سنوات من العمل الشاق، تم بنجاح تطوير ختشية اقتصادية عالية الحرارة تركيبها 50 في المئة نيكل ـ (50 ـ x) في المئة تيتانيوم ـ x في المئة هافنيوم. تتصف خليطة النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم الجديدة بدرجة حرارة تحوُّل طوري أعلى كثيراً من تلك التي

لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم أو النيكل ـ تيتانيوم ـ بلاتين التي لها نسب عدد الذرّات لعنصر الخليطة الثالث نفسه. إن تكلفة إنتاج الختشيات العالية الحرارة المؤلفة من النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم تساوي سُدس أو عُشر تكلفة إنتاج الخلائط نيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم بسبب سعر عنصر الهافنيوم المنخفض، وبسبب مقدار الهافنيوم الصغير اللازم للحصول على درجات حرارة الانتقال الطَوري نفسها. وفي الوقت نفسه، يشابه المفعول الختشي في الخليطة الجديدة ذاك الذي لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم. لذا، وبناءً على اعتبارات التكلفة والمفعول الختشي، اعتُبرت خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم أكثر الخلائط العالية الحرارة أهمية من حيث وجود تطبيقات لها.

**تُري النتائج التجريبية ما يأتي:**

**1** ـ يمكن لإضافة أكثر من 5 في المئة من الهافنيوم أن ترفع كثيراً درجة حرارة التحوُّل الطَوري. وعندما تكون نسبة الهافنيوم 30 في المئةذ، يمكن لدرجة حرارة الانتقال الأوستنيتي أن تصل إلى 450 مْ، إلا أن الإضافة الأولية للهافنيوم تخفّض درجة حرارة الانتقال.

**2** ـ تنخفض القوة الكيميائية الدافعة (Chemical Driving Force) مع ازدياد نسبة الهافنيوم في منطقة B19′ الأحادية الميل وتزداد في منطقة B19 المتوازية المستطيلات. ويتناقص S في المنطقة المرتنزيتية الأحادية الميل، ويبقى ثابتاً تقريباً في منطقة المرتنزيت المتوازية المستطيلات.

**3** ـ لا تغيّر إضافة الهافنيوم من سلوك حلقة التباطؤ لخلائط النيكل ـ تيتانيوم. أما التحوُّل المرتنزيتي في خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم فهو حراري المرونة.

**4** ـ تتصف خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم باستقرار في سيرورة الدورة الحرارية أفضل من ذلك الذي تتصف به الخلائط

الثنائية نيكل ـ تيتانيوم. ويتناقص التغيّر في درجة حرارة الانتقال في أثناء سيرورة الدورة الحرارية مع ازدياد نسبة الهافنيوم. في الخلائط نيكل ـ تيتانيوم ـ 25 في المئةذ هافنيوم، يساوي التغيّر في درجة حرارة الانتقال بعد 100 دورة حرارية 7 مْ فقط مقارنة بـ 30 مْ لخليطة النيكل ـ تيتانيوم الثنائية.

**5 ـ** أبدت خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم مفعولاً ختشياً وحيداً ومزدوج الاتجاه بعد تدريب حراري ميكانيكي مناسب. وازداد المفعول المزدوج الاتجاه مع ازدياد الانفعال الأولي المقترن بازدياد الانفعال المتبقّي مع ازدياده.

**6 ـ** تؤذي درجة حرارة التحوُّل الطَوري العالية المفعول الختشي المزدوج الاتجاه، وتأكَّد هذا بحقيقة أن المفعول الختشي المزدوج الاتجاه يتدهور مع زيادة حرارة التسخين .

**7 ـ** تُعدُّ الخلائط نيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم بدائل ممتازة لخلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم الغالية الثمن.

## خلائط تذكُّر الشكل العالية الحرارة

تقتصر الختشيات الواقعية على درجة حرارة $A_f$ قصوى تساوي 120 مْ، في حين أن $M_s$ تقع تحت 100 مْ عموماً. لكن نظراً إلى ازدياد طلب الختشيات ازدياداً كبيراً، فإن ثمة تزايداً في الحاجة إلى خلائط يحصل فيها الانتقال الطَوري عند درجات حرارة أعلى مما هو متوفّر حالياً. أما مجالات التطبيق الرئيسة لها فهي المفعِّلات في صناعتي السيارات والنفط، وفي تجهيزات الأمان[39].

وهناك اهتمام بها في الروبوتيات أيضاً، لأن الختشيات ذات

درجات حرارة التحوُّل الطَوري العالية تمكِّن من التبريد السريع، وهذا يمكن أن يوسِّع عرض المجال الحراري الذي يمكن للروبوت العمل ضمنه.

وبرغم أن كثيراً من الخلائط تتصف بدرجات حرارة انتقال طوري عالية، فإنه لم يجرِ تطوير تطبيقات حقيقية لها واسعة النطاق. ولم يتحدث أحد حتى الآن عن فتح علمي كبير، وذلك بسبب المشاكل التالية: أداء متدنٍّ (كثيراً)، مقارنة بخلائط النيكل ـ تيتانيوم الناجحة، جعل طَور المرتنزيت مستقرّاً، وتحلُّل المرتنزيت أو الطَور الأب، والهشاشة الناجمة عن اللاتناحي الشديد في المرونة، أو عن وجود أطوار أو رواسب هشة.

ثمة شرط آخر لتحقيق مفعول ختشي جيد، هو أن إجهاد تحريض المرتنزيت، أو إجهاد إعادة توجيه المرتنزيت، يجب أن يكون أدنى (كثيراً) من الإجهاد الحرج للانزلاق الطبيعي. ونظراً إلى أن هذا الإجهاد الحرج يتناقص عموماً مع ازدياد درجة الحرارة، فإن من الصعب جداً تحقيق ذلك الشرط، خصوصاً عند درجات الحرارة العالية. لذا يجب تصميم ختشية عالية الحرارة بتركيب أو بمعالجة حرارية ميكانيكية، بحيث يمكن تضمين آليات تقوية لزيادة الإجهاد الحرج للانزلاق.

ثمة ملخص في الجدول 4 ـ 4 لبعض المنظومات الموجودة في قيد الاستقصاء[39]. وقد جرى تطوير ختشيات جديدة عدة ذات درجات حرارة انتقال عالية[69]. وجرى تصنيع خلائط تيتانيوم ـ فانديوم، تيتانيوم ـ فانديوم ـ كروم، تيتانيوم ـ فانديوم ـ حديد، وتيتانيوم ـ زركونيوم ـ هافنيوم ـ نيكل بنسب تركيب مختلفة. ومن بين الخلائط الأخرى الختشيات العالية الحرارة نيكل ـ منغنيز ـ تيتانيوم المرشحة لتكون خلائط مفيدة. لكن التحوُّل المرتنزيتي في

هذه الخلائط التي تتميز بحلقة تباطؤ عريضة جداً (70 مْ) ليس عكوساً تماماً. إلا أن الاستقصاءات[69] بيَّنت أن عنصر التيتانيوم في الخليطة يمكن أن يقلِّص بنجاح عرض حلقة التباطؤ الحراري، وأن يضبط درجة حرارة التحوُّل الطَوري. وهذا ما يمكِّن خلائط النيكل ـ منغنيز ـ تيتانيوم من أن تستعيد شكلها الذي كان ما قبل التشوُّه استعادةً تامة. وتبيِّن دراسة أولية أن خلائط النيكل ـ منغنيز تتصف بمفعول ختشي يفوق ذلك الذي لخلائط أخرى جرى استقصاؤها (نيكل ـ تيتانيوم ـ بالاديوم ونيكل ـ تيتانيوم ـ هافنيوم). مرة أخرى، العيب الرئيس في هذه المادة هو هشاشتها الشديدة.

## المواد المركَّبة

### نيكل ـ تيتانيوم ـ ألمنيوم

في عمل واعد قام به وُو[69]، جرى تطوير مادة معدنية هي النيكل ـ تيتانيوم ـ ألمنيوم. وقد بُنيت طبقة ملتقى تفاضلية التدرّج من أُكسيد التنتاليوم TaO والنيكل ـ تيتانيوم على سلك نيكل ـ تيتانيوم بنجاح، ووُضع السلك في حاضنة من الألمنيوم. وبيّنت قياسات كل من المقاومة والاهتزازات أن تلك الطبقة توفّر عزلاً لسلك النيكل ـ تيتانيوم، ويمكن أن تُستخدم لكبت الاهتزازات في البُنى المرهفة[70].

### نيكل ـ تيتانيوم ـ كربيد التيتانيوم

استقصى فوكامي أوشيرو (Fukami-Ushiro) ودونانـد[71] (Dunand) سلوك استعادة الشكل في خلائط النيكل ـ تيتانيوم كتابع لانفعال أولي ميكانيكي ضاغط، وقارنَاه مع ذاك الذي للمواد المركَّبة نيكل ـ تيتانيوم التي تحتوي على نسبة حجمية تساوي 10 ـ 20 في المئة من الجُسيْمات المنفصلة. وفي ما يأتي ملخّص للاستنتاجات الرئيسة للدراسة:

**1 ـ** تتصف المواد المركَّبة نيكل ـ تيتانيوم ـ كربيد التيتانيوم غير المشوَّهة بمُعَاملي تمدّد خطي متغاير وتمدّد حراري أصغر من مُعَاملي النيكل ـ تيتانيوم غير المتشوِّه وغير المقوّى. وتتفق قيم تمدّدها الحراري مع تقديرات علاقة ميكانيك الأوساط المستمرة (Continuum Mechanics) بافتراض عدم استرخاء عدم التوافق الحراري بين الطَورين.

**2 ـ** في مواد النيكل ـ تيتانيوم ـ كربيد التيتانيوم المشوّهة، يجب تقليل عدم التوافق الذي يحصل بين جُسيْمات كربيد التيتانيوم المرنة والحاضنة نيكل ـ تيتانيوم، وذلك بإحداث انفعال إضافي لدن للحاضنة: إما بتشوّه انزلاقي غير عكوس، أو بالتوأمة (Twinning) العكوسة. ويتأثر كل من المفعولين الختشيين، الوحيد والمزدوج الاتجاه، قليلاً بوجود نسبة حجمية لا تزيد على 20 في المئة من الجُسيْمات السيراميكية، وهذا ما يدل على أن جزءاً كبيراً من عدم التوافق يمكن أن يُخفَّف بتوأمة الحاضنة. ويشير سلوك استعادة الشكل حرارياً في المادة المركَّبة إلى أن الانفعال اللدن بالانزلاق يزداد بازدياد نسبة كربيد التيتانيوم: ينخفض مطال الانفعال القابل للاسترجاع، ويتوسع التحوُّل الطَوري ليغطي مجالاً حرارياً أوسع، ويتحسَّن مفعول تذكُّر الشكل المزدوج الاتجاه. يمكن أيضاً تفسير المفعول الأخير، وانخفاض جميع درجات حرارة التحوُّل الطَوري بالإجهادات المرنة المتبقّية المحسَّنة في المادة المركَّبة.

## أنواع أخرى من خلائط تذكُّر الشكل

برغم التوافق الحيوي الجيد لخلائط النيكل ـ تيتانيوم[172]، فإن ثمة شكاً في استقرارها على المدى البعيد، أو في أمان المعالجة السطحية السيئة التي تؤدّي إلى استنزاف النيكل. ونظراً إلى أن النيكل

معروف بتفاعلاته التحسُّسية الشديدة، يمكن للختشيات الخالية من النيكل أن تكون مغرية. يمكن تطوير هذه الخلائط اعتماداً على التحوُّلات المتغايرة في التيتانيوم الشديد التوافق الحيوي. يتصف التيتانيوم النقي بانتقال طَوري متغاير من الطَور بيتا (البنية المكعبة الممركزة الجسم) إلى الطَور السداسي البنية عند درجة الحرارة 1155 مْ. لكن العناصر الانتقالية (Transition Elements) تجعل الطَور بيتا مستقرّاً. لذا، فإن درجة حرارة الانتقال الطَوري من (ألفا + بيتا) إلى بيتا تتناقص بازدياد نسبة العنصر الداخل في الخليطة.

يمكن تحويل خلائط التيتانيوم ذات الطَور بيتا إلى مرتنزيتية إذا بُرِّدت بسرعة، انطلاقاً من طَور بيتا المستقر. ويمكن تكوين نوعين من المرتنزيت، $\alpha'$ و$\alpha''$، اعتماداً على التركيب، وعلى ظروف معالجة المحلول[73].

المرتنزيت $\alpha'$ سداسي البنية، في حين أن $\alpha''$ يتصف ببنية متوازية المستطيلات (موشور قائم بقاعدة مستطيلة)[74]. والمرتنزيت $\alpha''$ هو الذي يتصف بمفعول تذكُّر الشكل، وأول من درسه بالتفصيل هو بايكر (Baker) في خليطة تيتانيوم ـ 35 في المئة نيوبيوم[75]. ومنذئذٍ، نُشرت دراسات عدة للمفعول الختشي، خصوصاً في الخلائط القائمة على التيتانيوم ـ موليبدن[60، 76 - 79، 81]. ويمكن الاطلاع على عمل منهجي بخصوص تأثير عناصر الخلط المختلفة في المفعول الختشي في المرجع 82. لذا فإن الخلائط شبه المرنة القائمة على الطَور بيتا من التيتانيوم يمكن أن توفّر بديلاً جيداً لخلائط النيكل ـ تيتانيوم في أسلاك تقويم الأسنان، على سبيل المثال. وقد طوَّر لاي (Lei) وزملاؤه[83] أخيراً خليطة من هذا النوع (تيتانيوم ـ 11 موليبدن ـ 3 ألمنيوم ـ 2 فاناديوم ـ 4 نيوبيوم)، وتم الحصول على شبه مرونة جيدة من درجة 3 في المئة بعد تشغيل على البارد ومعالجة حرارية مناسبين.

## خلائط الحديد ـ منغنيز ـ سليكون ـ كروم ـ نيكل

إن التركيب الكيميائي للختشيات التي طُوِّرت في وقت لاحق، والقائمة على الحديد، معقّد عموماً، ويتضمّن مقادير كبيرة نسبياً من السليكون والمنغنيز والكروم والنيكل[19)(2]. وقد بيَّنت دراسات أُجريت في معهد شونان للتقانة[70] (Shonan Institut of Technology) ما يأتي:

**أ)** في الخليطة حديد ـ سليكون ـ منغنيز ـ كروم ـ نيكل، حصل مفعول ختشي أعظمي عند نسبة 6 في المئة من النيكل.

**ب)** يتأثر المفعول الختشي كثيراً بمعدل التبريد بعد معالجة المحلول. إن التبريد السريع ضروري للحصول على مفعول كبير جداً لتذكُّر الشكل.

**ت)** يوفر هذان الشرطان توزعاً أولياً مثالياً للتصدّعات الطبقية المتراكبة ولصفائح المرتنزيت. وعند انفعال العيّنات، فإن التحوُّل من γ إلى ε المتحرِّض بالإجهاد يمكن أن يتحقَّق بإجهاد أصغري.

**ث)** إن كفاءة التدريب ليست متساوية في جميع الخلائط. وسبب ذلك هو أن توزُّعات التصدّعات الطبقية المتراكبة وصفائح المرتنزيت الناجمة عن التدريب تعتمد اعتماداً كبيراً على محتوى الخليطة.

## المواد المركَّبة الهجينة

### المواد المركَّبة من ألياف ختشية وحاضنة معدنية

يمكن تلخيص طرائق تصميم مواد الألياف الختشية والحاضنة المعدنية بخمس خطوات[84)(85]: **(1)** تُحضَّر هذه المواد وتُصنَّع باستخدام تقنيات التصنيع المعهودة. **(2)** تُسخَّن المواد المصنّعة حتى درجات حرارة عالية لجعل الألياف تتذكر شكلها أو لإجراء معالجة حرارية معيّنة لمادة الحاضنة إذا اقتضت الحاجة. **(3)** نظراً إلى أن

الختشيات تتصف بجساءة ضعيفة جداً في مرحلة المرتنزيت، أو بخضوع يحصل آنياً في مرحلة الأوستنيت فوق درجة بدء المرتنزيت بالتحوُّل الطَوري $M_s$ بقليل، تُبرَّد المواد المركَّبة إلى درجات حرارة أخفض، ويفضَّل أن تكون في الحالة المرتنزيتية. **(4)** تُخضع المواد المركَّبة إلى مزيد من التشويه عند درجات الحرارة المنخفضة لتمكين المرتنزيت من التوأمة، أو تمكين حصول التحوُّل المرتنزيتي المحرض بالإجهاد. **(5)** ثم تُسخَّن المواد المركَّبة القَبْلية الإجهاد حتى درجات حرارة أعلى، يفضل أن تكون فوق درجة حرارة انتهاء الانتقال إلى الأوستنيت $A_f$، حيث تنحل توأمة المرتنزيت، أو يحصل الانتقال من المرتنزيت إلى الأوستنيت، وحيث تحاول ألياف التيتانيوم ـ نيكل استعادة أشكالها الأصلية، ولذا تنزع إلى الانكماش، مسببةً إجهادات ضغط داخلية متبقية في المادة. يمكن لمفهوم التصميم هذا أن يُطبَّق على مواد مركَّبة ذات حاضنة بوليمرية تحتوي على ألياف ختشية، وعلى مواد مركَّبة ذات حاضنة معدنية تحتوي على جُسيْمات ختشية.

وتتصف المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية المقوّاة بألياف ختشية بخواص محسَّنة أخرى أيضاً. على سبيل المثال، جرى قياس المقدرة التخميدية لمادة مركَّبة من ألياف التيتانيوم ـ نيكل في حاضنة من الألمنيوم، وأشارت النتائج إلى تحسُّن هائل في المقدرة التخميدية للمادة المركَّبة في المجال الحراري 270 ـ 450 كلفن مقارنة بمقدرة الألمنيوم غير المقوى. ويُتوقع أن تكون لهذه المادة المركَّبة مقاومة اهتراء كبيرة.

### المواد المركَّبة من ألياف ختشية وحاضنة بوليمرية

بناء على المعالجة الأولية للألياف الختشية، وعلى تشكيلة توزيعها، وعلى مادة الحاضنة المضيفة، يمكن تصميم أنواع مختلفة

من المواد المركَّبة الهجينة، ذات الحاضنة البوليمرية، التي يمكن أن تتحكم، على نحو نشط أو غير نشط، بالخواص السكونية والحركية للمادة المركَّبة. في حالة التحكّم غير النشط، ومثالها مواد الألياف الختشية والحاضنة الألمنيومية، تُستخدم ألياف ختشية لتقوية الحاضنة البوليمرية، وامتصاص طاقة الانفعال، وتخفيف الإجهاد الداخلي المتبقّي، ومن ثمَّ تحسين مقاومة التصدّع بالتحوُّلات المرتنزيتية المحرَّضة بالإجهاد. وفي حالة التحكّم النشط، تُفعَّل الألياف الختشية عادة بالتسخين بالتيار الكهربائي، حيث تخضع إلى التحوُّلات المرتنزيتية العكسية، مؤدّيةً إلى تغيّر في جساءة المادة المركَّبة وشكلها، وفي مطال وتردّد اهتزازها، وفي ناقليتها الصوتية.

وتوفّر المواد المركَّبة المتقدمة، من قبيل الغرافيت/ إيبوكسي أو الزجاج/ إيبوكسي، مقاومة شدّ كبيرة وجساءة شديدة مع وزن خفيف وتكلفة معتدلة. إلا أنها تتصف بمقاومة ضعيفة للصدم لأنها تفتقر إلى آلية كفوءة لتبديد طاقة انفعال الصدم كالخضوع اللدن الذي نجده في المعادن المطاوِعة. لذلك فإن المادة المركَّبة تبدِّد طاقة قليلة نسبياً في أثناء التحميل الصدمي الشديد، وتنهار بطريقة كارثية إذا تجاوز الإجهاد مقاومة المادة المركَّبة القصوى. يتطوَّر التلف عادة من تصدُّع الحاضنة وتفكُّك صفائحها إلى تكسُّر الألياف وانثقاب المادة. وقد كانت ثمة محاولات مختلفة لزيادة مقاومة الصدم، وعلى وجه الخصوص مقاومة الانثقاب، في المواد المركَّبة الهشة. إن مفهوم التصميم الرائج بهذا الخصوص هو تكوين بنية هجينة تُستخدم فيها ألياف أمتن لزيادة مقاومة الصدم، إلى جانب ألياف غرافيتية أمتن وأقوى لتحمل معظم الحمل. وقد تحقَّقت في المواد المركَّبة الهجينة المكوَّنة من الغرافيت/ إيبوكسي مع ألياف كفلار وسبكتراغ وألياف S الزجاجية تحسينات معتدلة في مقاومة الصدم.

ومن بين المواد الهندسية المتنوعة، تتصف الختشيات الشديدة الانفعال بأعلى مقاومة شدّ قصوى نسبياً. وهي تستطيع امتصاص وتبديد مقدار كبير من طاقة الانفعال، أولاً من خلال التحوُّلات المرتنزيتية المحرَّضة بالإجهاد، ثم من خلال الخضوع اللدن. لذا يمكن تحسين مقاومة الصدمة في المواد المركَّبة غرافيت/ إيبوكسي بتهجينها مع ألياف ختشية. على سبيل المثال، بيَّن المفهوم المذكور آنفاً أنه في ظروف تحميل معيّنة، يمكن تحسين مقدرة المواد المركّبة من الغرافيت والزجاج على امتصاص طاقة الصدم على نحو فاعل بتهجين المادة المركَّبة بألياف ختشية من التيتانيوم ـ نيكل. إن المواد المركَّبة الهجينة ذات مقاومة الصدم والانثقاب المحسَّنة مغرية جداً بسبب إمكاناتها الكبيرة في التطبيقات العسكرية والمدنية التجارية.

يمكن عموماً تصنيع المواد المركَّبة الختشية الهجينة بطرائق تصنيع المواد المركَّبة ذات الحاضنة البوليمرية المعهودة، بوضع الألياف الختشية ضمن المادة الأولية المضيفة بين أسلاك تقوية، ثم استخدام إما الكبس الحار أو المِحَمّ مع أنواع عدة من دورات التصليد. سابقاً، لم تكن محاولات تضمين أسلاك تيتانيوم ـ نيكل مباشرة في الحاضنة البوليمرية ناجحة بسبب صعوبات التصنيع والمشاكل المقترنة بروابط ملتقيات المواد. ولتجنب مسألة روابط الملتقيات، وُضعت الأسلاك الختشية ضمن حاضنة بوليمرية باستخدام أكمام قارنة. وطُبِّق ذلك على كل من المواد المركَّبة الحرارية التصليد والحرارية التلدّن.

توفّر المواد المركَّبة الحرارية التلدّن المقوّاة بالألياف، نسبياً بعض المزايا الكبرى مقارنةً بالمواد الحرارية التصليد المقوّاة بالألياف، وذلك بسبب جساءتها النوعية الممتازة، ومتانتها العالية تجاه الكسر، وامتصاصها المنخفض للرطوبة، وإمكانات تصنيعها

السريعة والمجدية اقتصادياً. إلا أن درجات حرارة المعالجة العالية يمكن أن تمثل مشكلة لتضمين عناصر ختشية في الحاضنة. إن المعالجة الحرارية للمواد الحرارية التلدّن يجب أن تُجرى عند درجات حرارة أعلى، عادةً بين 423 و673 كلفن، في حين أن دورة المعالجة الحرارية للمواد المركَّبة الحرارية التصليد تقع في مجال أدنى نسبياً يمتد من درجة حرارة الغرفة حتى 443 كلفن.

ولسيرورة دورة التلدين الحراري تأثير في البنية الميكرويّة للألياف الختشية، يتجلَّى في تغيّر درجات حرارة التحوُّل الطَوري، وفي الإجهاد الأقصى لاستعادة الشكل: تنزاح درجات حرارة الانتقال الطَوري نحو الأعلى، في حين أن الإجهاد الأقصى لاستعادة الشكل ينخفض نتيجة المعالجة الحرارية. أما التصليد الحراري، فلا يؤثّر إلا قليلاً في خصائص التحوُّل الطَوري للألياف الختشية.

إلا أن بعض الخواص الحركية للألياف الختشية يمكن أن تتأثر كثيراً. لذا يجب إيلاء عناية تامة لدرء استعادة شكل الألياف، أو الأسلاك الختشية القَبْلية التشوُّه في أثناء دورة تصليد المادة المركَّبة. يمكن تبسيط تصنيع المواد الختشية المركَّبة كثيراً باستخدام مفعول ختشي مزدوج الاتجاه، أي إن الأسلاك الختشية تُدرَّب لتكتسب مفعولاً ختشياً مزدوج الاتجاه قبل وضعها ضمن الحاضنة.

## مواد مركَّبة من جُسيْمات ختشية منفصلة وحاضنة من الألمنيوم

استرعت مواد الحاضنة المعدنية كثيراً من الانتباه بسبب إمكان استخدامها في الإنتاج الكمي، وخواصها الميكانيكية الواعدة، ومقدرتها الكبيرة على تخميد الاهتزازات. إذ تبيَّن في التطبيقات التي لا تتطلب تحميلاً شديداً، أو ظروفاً حرارية قاسية، من قبيل قطع السيارات، أن مواد الحاضنة المعدنية المقوّاة تقوية متقطعة تحقِّق

تحسينات هائلة في الخواص الميكانيكية. وعلى وجه الخصوص، توفّر الحاضنات المصنوعة من خليطة ألمنيوم والمقوّاة تقوية متقطعة تخميداً شديداً للاهتزازات، إضافة إلى الكثافة المنخفضة، وتمكّن من كبت الاهتزازات الميكانيكية غير المرغوب فيها، وكبت انتشار أمواجها. وعلى غرار المواد المركَّبة المقوّاة بالألياف، تتحقَّق تقوية هذه المواد من خلال توليد إجهادات ضاغطة بواسطة الأطوار المقوية، تنجم عن عدم توافق مُعَامليْ التمدّد الحراري لكل من الحاضنة والمادة المقوية.

إن أكثر مواد التقوية استخداماً هي جُسيْمات الـ SiC والـ $Al_2O_3$ والغرافيت. يمكن لإضافة الـ SiC أو الـ $Al_2O_3$ إلى الحاضنة الألمنيومية أن تؤدّي إلى ربح هائل في الجساءة والمقاومة النوعيتين، إلا أن التغيّرات الناتجة في المقدرة التخميدية يمكن أن تكون إيجابية أو سلبية. ويمكن لجُسيْمات الغرافيت أن تؤدّي إلى زيادة ملحوظة في المقدرة التخميدية، إلا أن ذلك يحصل على حساب معامل المرونة. وقد اقتُرح قبل مدة[84] مفهوم تقوية الحاضنة الألمنيومية اعتماداً على المفعول الختشي لجُسيْمات تيتانيوم ـ نيكل متناثرة ضمن الحاضنة. تشابه آلية التقوية هنا تلك التي في المواد المقوّاة بألياف ختشية: سوف تحاول الجُسيْمات الختشية القَبْلية التشوُّه استعادة شكلها الأصلي في أثناء الانتقال العكسي من المرتنزيت إلى حالة الأب (الأوستنيت) بالتسخين، ولذا سوف تولِّد إجهادات ضاغطة في الحاضنة على طول اتجاه التشوّه، وهذا بدوره يحسِّن خواص الشدّ في المادة المركَّبة في مرحلة الأوستنيت. وفي ضوء مفهوم التمتين بالانتقال الطَوري الشهير (Transformation Toughening Concept)، يمكن أيضاً الوصول إلى بعض الخواص التكيُّفية كالاسترخاء الذاتي للإجهادات الداخلية بتضمين جُسيْمات ختشية في بعض المواد الحاضنة.

ونظراً إلى أن الختشيات تتصف بقيم كبيرة نسبياً لعامل الفقد (Loss Factor) في حالة طَور المرتنزيت، يُتوقَّع حصول تحسُّن في المقدرة التخميدية، للمواد الختشية المقوّاة بالجُسيْمات المنفصلة في مرحلة المرتنزيت. لذا يمكن استخدام الجُسيْمات الختشية ماصَّات للإجهاد أو الاهتزاز في الدهانات والوصلات واللواصق والمواد البوليمرية ومواد البناء.

يمكن تصنيع المواد المركَّبة المقوّاة بجُسيْمات ختشية منفصلة بتصليد حاضنة ألمنيومية وجُسيْمات ختشية منفصلة أو مساحيق خلائطية بتعدين المسحوق. ويمكن تحضير الجُسيْمات الختشية المنفصلة بالسيرورات المعهودة، ومنها التذرير (Atomization) والبخ (Spray) والتصليد السريع، التي تستطيع إنتاج مساحيق تختلف مقاسات حُبيْباتها من النانومترات حتى المكرومترات. لا يوجد في المنشورات المفتوحة إلا القليل عن إنتاج الجُسيْمات الختشية، لكن أخيراً، جرى تطوير طريقة لتحضير جُسيْمات ختشية منفصلة من خليطة التيتانيوم ـ نيكل ـ نحاس بالهدرجة ثم الطحن بالكرات ثم عكس الهدرجة. وثمة أهمية خاصة للخلائط الثلاثية تيتانيوم ـ نيكل ـ نحاس، حيث يُستعاض عن النيكل بالنحاس بنسبة تصل إلى 30 في المئةذ، بسبب اتصافها بحلقة تباطؤ ضيقة ولدانة انتقال كبيرة ومقدرة عالية على امتصاص الصدمات، إضافة إلى المفعول الختشي.

## المواد المركَّبة من جُسيْمات سيراميكية منفصلة وحاضنات ختشية

في الحاضنة الختشية، يمكن لجُسيْمات طَور ثانٍ متناثرة أن تترسَّب أو تتكوَّن في أثناء التصليد أو المعالجة الحرارية (الميكانيكية)، مولِّدة بذلك مادة مركَّبة أولية. لذا يمكن تعديل

خصائص التحوُّل المرتنزيتي في المادة بالتحكّم في الجُسيْمات، وفق ما عُرض في خلائط التيتانيوم ـ نيكل (نيوبيوم) أو نحاس ـ زنك ـ ألمنيوم أو نحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل ـ منغنيز ـ تيتانيوم، أو يمكن لوجود طَور ثانٍ من السيراميك ضمن الحاضنة الختشية أن يؤدّي إلى مادة مركَّبة جديدة ذات كثافة أخفض، ومقاومة شدّ وجساءة وصلابة ومقاومة خدش أعلى. وبالمقارنة بالمواد المركَّبة من السيراميك والمعدن الشائعة، يمكن توقع لدانة أعلى لهذه المادة المركَّبة لأن الانتقال المرتنزيتي المحرَّض بالإجهاد يمكن أن يرخي تركيز الإجهاد الداخلي، ولذا يدرأ التصدّع. سابقاً، كانت المواد المركَّبة من النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم المقوّاة بجُسيْمات الـ $Al_2O_3$ تُحضَّر بطريقة السكب العادية، وقد اقتُرح أن هذه المادة ملائمة لتطبيقات تتطلب تخميد اهتزازات شديد ومقاومة اهتراء جيدة. باستخدام الكبس الانفجاري (Explosive Pressing) لمزيج المسحوق، جرى تحضير المادة المركَّبة TiC/Ti-Ni، حيث وُجد في هذه المادة الملبدة أن مقاومة الحَنِي ومقاومة الانضغاط وكثافة الإجهاد كانت أعلى كثيراً من تلك التي للمادة المركَّبة TiC/Ti-Ni أو WC/Co. وبزيادة نسبة كربيد التيتانيوم TiC، ازدادت القساوة ومقاومة الانضغاط، وانخفضت المطاوَعة والمتانة.

وفي وقت لاحق، استقصى دوناند وزملاؤه[71] بطريقة ممنهجة مادتين مركَّبتين لهما حاضنة من التيتانيوم والنيكل وتحتويان على 10 في المئة و20 في المئة من جُسيْمات كربيد التيتانيوم المتساوية الأطوال المحورية. وحُضِّرت المواد المركَّبة من مسحوق تيتانيوم ـ نيكل قَبْلية الخلط مقاس جُسيْماتها الوسطي يساوي 70 ميكروناً، وجُسيْمات كربيد التيتانيوم بمقاس وسطي يساوي 40 ميكروناً، باستخدام تقنيات تعدين المسحوق. تعدِّل جُسيْمات كربيد التيتانيوم

حالة الإجهاد الداخلي في الحاضنة المصنوعة من التيتانيوم ـ نيكل، ومن ثَمَّ سلوك التحوُّل الطَوري للمادة المركَّبة. وخلافاً للمواد المركَّبة ذات الحاضنات التي تتشوّه بالانزلاق فقط، فإنه يُتوقع أن تكون آليات تشوُّه أخرى، مثل التوأمة والتحوُّل الطَوري المحرَّض بالإجهاد، هي العاملة في مواد التيتانيوم ـ نيكل في أثناء التشوُّه الشامل للحاضنة، وتشوّهها المحلي بالقرب من جُسيْمات التقوية، وهذا ما يؤدّي إلى مفعول شبه مرن وشبه مطاطي.

## المواد المركَّبة من جُسيْمات مغنطيسية منفصلة وحاضنة ختشية

توفّر المواد العملاقة المتغيّرة الشكل مغنطيسياً $(TB_yDy_{1-y})x$ $Fe_{1-x}$ (الترفينول ـ د Terfenol-D) انزياحات وكثافة طاقة أكبر، وإمكانات تصنيع ممتازة، مقارنةً بالمواد الكهربائية الاستقطاب (Ferroelectric). إلا أن تطبيقاتها محدودة بمقاومتها الضعيفة للكسر، وبالمفاقيد الناجمة عن التيارات الكهربائية التحريضية عند الترددات العالية، وبمتطلبات الإجهاد الأولي. قبل مدة قصيرة، طُوِّرت مواد مركَّبة في السويد تقوم على مساحيق ترفينول ـ د ومواد رابطة عازلة. إن هذه المواد المركَّبة توسِّع المجال المفيد للترفينول ـ د بتحسين مقاومته للشد ومتانته تجاه الكسر، إضافة إلى الإمكانات الكبيرة في استخدامها في قارنات تغيير الشكل مغنطيسياً. وقد اقتُرح مفهوم تصميمي لتضمين جُسيْمات الترفينول ـ د ضمن حاضنة ختشية لتكوين مادة مركَّبة تتذكَّر الشكل مغنطيسياً لها خصائص المواد الختشية والمواد المتغيرة الشكل مغنطيسياً. تمتطُّ جُسيْمات الترفينول ـ د بمقدار 0.1 في المئة تقريباً حين تطبيق حقل مغنطيسي عليها. والقوة التي تتولَّد من ذلك كبيرة بقدر يكفي لتحريض تحوّلات مرتنزيتية في الحاضنة عند درجات حرارة مناسبة. لذا فإنه يمكن التحكّم بنمو

وتوجيه صفائح المرتنزيت بالحقل المغنطيسي، وبتوزُّع وخواص جُسيْمات الترفينول ـ د ضمن الحاضنة.

وكبديل لذلك، يمكن أيضاً استخدام المقدرة التخميدية الكبيرة غير النشطة للمساحيق المغنطيسية والحاضنة الختشية. من المعروف أن ختشيات النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم تتصف بمقدرة تخميدية عالية عند مطالات انفعال كبيرة تنجم عن التحولات المرتنزيتية الحرارية التلدّن، إلا أن جساءتها ليست ملائمة لبعض التطبيقات الإنشائية. ومن المعروف أن الخلائط الحديدية المغنطيسية، ومنها الترفينول ـ د والحديد ـ كروم والحديد ـ كروم ـ ألمنيوم والحديد ـ ألمنيوم، تتصف بمقاومة شدّ عالية نسبياً، إضافة إلى مقدرة تخميدية كبيرة في مجال مطالات الانفعال الصغيرة. ومن حيث المبدأ، يجب أن يؤدّي تركيب من حاضنة نحاسية ـ زنك ـ ألمنيوم، وإضافات من خليطة حديدية مغنطيسية، إلى مقدرة تخميدية كبيرة على مجال واسع من مطالات الانفعال وإلى جساءة أكبر من تلك التي لخلائط النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم الصلبة.

بناءً على ذلك، صُنعت ثلاثة أنواع من المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية من مساحيق خليطة النحاس ـ 26.5 في المئة وزنك ـ 4.0 في المئة وألمنيوم (بوصفها حاضنة)، و30 في المئةح من رقاقات صُلِّدت سريعاً من خلائط الحديد ـ 7 في المئةو ألمنيوم، والحديد ـ 20 في المئة وكروم، والحديد ـ 12 في المئة وكروم ـ 3 في المئة وألمنيوم، بتقنيات تعدين المسحوق. وكانت الملتقيات بين الحاضنة نحاس ـ زنك ـ ألمنيوم والرقاقات خالية من الرواسب أو منتجات التفاعل. وقد وُجد أن المقدرة التخميدية في جميع المواد المركَّبة الثلاث، من أجل انفعالات بين$10^{-4}$ × 1.0 و$10^{-4}$ × 6.0، شهدت تحسينات هائلة عموماً. وعلى وجه الخصوص، أبدت رقاقات الحديد ـ زنك مع الحاضنة نحاس ـ زنك ـ ألمنيوم أعلى

مقدرة تخميدية كلية، مع ذروة تخميد إضافية عند انفعال مقداره $165 \times 10^{-6}$.

## أشكال القطع المصنوعة من خلائط تذكر الشكل

تُصنع الختشيات بكثير من الأشكال المعتادة المتوقعة للخلائط: سلك مسحوب دائري المقطع، سلك مسطح، أنبوب، صفيحة ملفوفة، وأغشية رقيقة مرذَّذة. ومن الأشكال الأخرى مكوّنات ذات أشكال منتظمة، وأسلاك وأنابيب غير منتظمة الأشكال، وأسلاك متناوبة النوى (أسلاك نيكل ـ تيتانيوم مملوءة بمادة ناقلة أو غير شفافة للإشعاع)، وأسلاك مطلية بالبولي ترافلوروإيثلين (التفلون). إن خلائط النيكل ـ تيتانيوم ـ X هي أكثر الخلائط المتوافرة حالياً بتلك الأشكال.

إن معالجة المادة الختشية شديدة الأهمية للسلوك الختشي. وثمة كثير من عمليات الضبط لاستمثال خواص شكل المادة لتطبيق معيّن. إلا أن معظم الجهود تُبذل لاستمثال التوازن بين استعادة الشكل والمطاوَعة ومقاومة الشد. تُصهر الختشيات، ومنها النيكل ـ تيتانيوم، عادة مع التحكُّم الدقيق بالنقاوة والتركيب، وتُشغَّل وهي حارة لتُجعل قضباناً أو ألواحاً، ثم تُشغَّل وهي باردة لتأخذ أشكالها النهائية، وتُخضع إلى معالجة ميكانيكية حرارية متخصّصة لتحسين خواصها الختشية.

طوَّرت شركة Furukawa Electric Co., Ltd صفائح ختشية من النيكل والتيتانيوم سماكتها 30 ميكروناً. لكن هذه الختشيات هشة وتتكسر بسهولة، وهذا ما يجعل لف الصفائح صعباً جداً، ولذا كان من الصعب جداً تسويق مواد صفيحية منها بسماكة تقل عن 100 ميكرون. يُشار إلى أن هذه هي أول صفيحة خلائطية تُطوَّر بسماكة 30 ميكروناً.

تُنتَج هذه الخليطة من مزيج من النيكل والتيتانيوم، لكنها تتصدّع بسهولة إذا خضعت للإجهاد. وهي تصبح صلبة مباشرة بعد تكوينها. أما وثوقيتها فلا تتجاوز 20 في المئة مقارنةً بوثوقية خلائط النحاس والألمنيوم التي تبلغ 70 ـ 80 في المئة.

أدّى نجاح البحث الذي أُجري لمعرفة أسباب تصدُّع الخلائط إلى تطوير تقانة لدرء ذلك التصدُّع، وهذا ما مكَّن من إجهاد الخليطة ولفّها. وفي الوقت نفسه، استُمثلت ظروف اللف، فتحسَّنت قابلية الخليطة للف بمقدار 50 في المئة. ونتيجةً لذلك أصبح الآن من الممكن صنع ألواح وشرائط ختشية من النيكل والتيتانيوم أرق من 1 ملم بعرض يصل إلى 50 مم، وأسمك من 1 ملم، بعرض يصل إلى 130 مم.

تمكِّن الختشيات المؤلفة من النيكل والتيتانيوم من ضبط درجة حرارة استعادة الشكل لتكون بين 0 و100 مْ. ويمكِّن تطوير هذه الختشيات الجديدة، بعد أن طُوِّرت الأنواع المعهودة من الختشيات السلكية، من استخدام هذه الخليطة في طيف واسع من التطبيقات، كصناعة القطع الإلكترونية وقطع الآلات.

## اعتبارات التصميم وقيوده

حين التصدّي للقيام بتصميم ما، قد يرغب المصمِّم في تطوير حلول باستخدام خواص الختشيات الفريدة والمثيرة. لذا فإنه من المهم جداً للمصمّمين أن يفهموا تعقيد سلوك الختشيات. وكقاعدة عامة، إذا أمكن استخدام المواد والتصاميم العادية للوصول إلى حل يُحقِّق على نحو مقبول النتيجة المرغوب فيها، فإن استخدام الختشيات لتحقيق حل بديل سوف يُضخِّم تعقيد الحل وتكلفته. إن أفضل استخدام للختشيات هو حيث تكون خواصها الفريدة ضرورية

لنجاح التصميم، أي حيث لا تستطيع المواد العادية تحقيق متطلبات التطبيق.

يتطلب تصميم تطبيقات الختشيات أكثر من مجرد التقنيات الشائعة وطرائق الكتب المدرسية. فنظراً إلى خواصها الفريدة، ثمة اعتبارات عدة تخص تصميم الختشيات يجب الاهتمام بها وأخذها في الحسبان. في ما يلي، نورد معظم القضايا التي تجب العناية بها قبل تصميم تطبيق باستخدام الختشيات.

**إرشادات عامة**

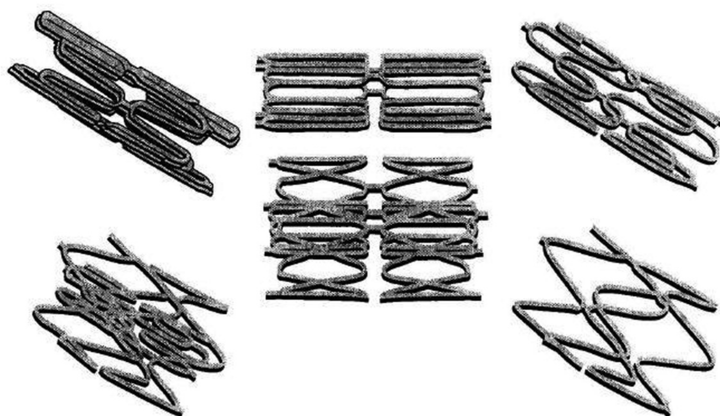
**1 ـ التشوّه العكوس**: يجب أن يكون الانفعال القابل للانعكاس المفترض في المادة الختشية ضمن حدود ما تسمح به الخليطة المختارة. على سبيل المثال، يمكن لخليطة النيكل ـ تيتانيوم أن تعكس تشوُّهاً مقداره 8 في المئة في تطبيقات المرة واحدة، وأقل من 4 في المئة في تطبيقات المرات المتعدّدة. أما حدود التشوُّه التي يُوصى بها فهي 6 في المئة للنيكل ـ تيتانيوم و2 في المئة للنحاس ـ زنك ـ ألمنيوم لتطبيقات عدد المرات المنخفض، و2 في المئة و0.5 في المئة للتطبيقات العديدة المرات. أما في ما يخص التطبيقات التي تتطلب تذكُّر الشكل المزدوج الاتجاه، فإن التشوُّه الكبير جداً القابل للانعكاس يساوي نحو 2 في المئة.

**2 ـ الاستقرار عند درجات الحرارة العالية**: يجب الاهتمام باستقرار الخليطة إذا كان التطبيق يتضمّن العمل عند درجات حرارة عالية. إن خلائط النيكل ـ تيتانيوم هي أكثر الختشيات استقراراً عند درجات الحرارة المرتفعة، وتستطيع تحمُّل التعرض إلى درجات حرارة تصل إلى 250 مْ تقريباً قبل فقدان الشكل المحفوظ سابقاً. وفي ما يخص خليطة النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم، فإن الحرارة القصوى هي 90 مْ تقريباً.

**3 ـ التعب**: يمكن تعريف تعب الختشية بأنه تدنّي واحدة أو أكثر من خواصها الوظيفية. يمكن للتعب أن يتجلّى على شكل تكسُّر، أو انخفاض في معدل التشوّه القابل للانعكاس، أو انزياح لدرجات حرارة التحوُّل الطَوري، أو انخفاض في جهد عكس التشوّه، وذلك بناء على عدد مرات التطبيق وتردّدها ومجال درجات الحرارة والإجهاد والانفعال.

**4 ـ التكلفة**: إن معظم الختشيات أغلى بطبيعتها من المواد العادية بسبب التكلفة العالية لكل من المواد الأولية وطرائق المعالجة المطلوبة. فالتحكّم في تركيب المادة الختشية من المكوِّنات الخام يتطلب أفراناً وسيرورات خاصة. وتحقيق خواص أمثلية للمادة الختشية يتطلب سلسلة مكثفة من التشغيل البارد والتطرية. ويتطلّب إنتاج الأشكال والأنماط الكثيرة المتنوعة من المواد الختشية أدوات تداول وتثبيت خاصة. وكل ذلك يرفع تكلفة استخدام الختشيات.

**5 ـ إمكان النمذجة الحاسوبية**: يُستخدم تحليل العناصر المنتهية (Finite Element Analysis)، المستخدم عادةً في تصميم المواد العادية، أيضاً في نمذجة سلوك الختشيات. إلا أن هذا التحليل صعب، ويجب ألا يعتمد على برمجيات المواد العادية، لأن خواص الختشيات الوظيفية تقوم على عوامل غير مُمَعيرة من قبيل التركيب النسبي وعمليات المعالجة التي خضعت لها في السابق. بل يجب أن تكون ثمة تقنيات نمذجة شديدة التخصص تأخذ في الحسبان حالة المادة الختشية بعد أخذها شكلها النهائي بعد التدريب، إضافة إلى العلاقة اللاخطية لمنحني الانفعال مع الإجهاد، واعتماد الخاصية على درجة الحرارة، والفارق السلوكي في الإجهاد بين حالتي التحميل وإزالة الحمل. يبيّن الشكل 4 ـ 5 نموذج تحليل عناصر منتهية لشبكة شريان تاجي فائقة المرونة أُجري باستخدام برمجيات نمذجة مفصَّلة للتوقّع بالخواص الميكانيكية بدرجة عالية من الدقة.



**الشكل 4 ـ 5: نموذج لشبكة نيكل- تيتانيوم ذاتية التوسع في حالتي التوسع والانقباض جرى إعداده بتقنية تحليل العناصر المنتهية.**

## تقنيات معالجة المواد

جرى في السنوات الأخيرة تطوير ختشيات قائمة على النحاس على نطاق واسع بسبب تكاليفها المنافسة وسيرورة تصنيعها السهلة، مقارنة بختشيات النيكل ـ تيتانيوم. ومن بين الختشيات القائمة على النحاس، كان للمنظومة CAN (Cu-Al-Ni) أفضل استقرار حراري[86]. لكن استخدام طريقة الصب العادية في تحضير الختشيات ينطوي على صعوبات في التحكّم بمقاسات الحُبيْبات، والحُبيبات الخشنة تُضعف خواص الخليطة الميكانيكية. ثمة تقارير بخصوص إمكان استخدام الخلط الميكانيكي (Mechanical Alloying) وتعدين المسحوق (Powder Metallurgy) مع الكبس الحار المتساوي الضغط (HIP) لصنع ختشيات قائمة على النحاس[87][91]. فتعدين المسحوق

يمكن أن يقلِّص المعالجة بالتشغيل الساخن في تصنيع المنتجات ذات الأشكال شبه النهائية، ويمكِّن عادةً من تحكم أفضل بمقاسات الحُبيْبات.

### ختشيات النحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل

يُنتِج الخلط الميكانيكي مساحيق قَبْلية الخلط، وهذا يمكن أن يقصِّر مدة التلبيد. ومع ذلك، ليس ثمة من عمل سابق بخصوص تحضير ختشية نحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل بالخلط الميكانيكي وتعدين المسحوق العادي مع الرص على البارد[92]. في هذه الدراسة[92]، استُخدم الطحن الكوكبي بالكرات (Planetary Ball Milling) العالي الطاقة لتحويل مزيج مساحيق النحاس والألمنيوم والنيكل العنصرية إلى مساحيق قَبْلية الخلط. واستُخدم تعدين المسحوق العادي مع الرص على البارد لتكوين ختشية جَسِيمة قائمة على النحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل من تلك المساحيق بواسطة الخلط الميكانيكي.

أجرى تانغ (Tang) وزملاؤه[92] سلسلة استقصاءات تبيَّن فيها ما يأتي:

**1** ـ يُمكن استخدام الخلط الميكانيكي لتحضير مساحيق قَبْلية الخلط قائمة على النحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل. وقد أُنتج طَور وحيد من بنية ذات موسِّطات شبكية قريبة من تلك التي للنحاس بعد خلط ميكانيكي لمزيج المساحيق العنصرية دام 40 ساعة.

**2** ـ جرى تنعيم مقاسات حُبيْبات الخليط المرصوص الملبّد بمزيد من الطحن، وكانت الحُبيبات أصغر من 2 ميكرون .

**3** ـ تتزايد القساوة الميكرويّة للمواد المرصوصة الطرية والملبّدة

مع تزايد مدة الخلط الميكانيكي، لكن قساوة المواد المرصوصة الملبّدة تتناقص مع تزايد نسبة المسامات المفتوحة.

**4** ـ تتأثر كثافة المادة المرصوصة بقساوة ومقاسات جُسيْمات المسحوق. وقد تحقَّقت أعلى كثافة للمواد الطرية والملبّدة من خلط ميكانيكي لمزيج المساحيق دام 15 ساعة.

**5** ـ يمكن استخدام تعدين المسحوق العادي مع الرص على البارد لإنتاج خليطة نحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل من مساحيق خُلطت ميكانيكياً.

## تقنيات التصنيع

### الوصل

نظراً إلى وجود أكثر من مئة طريقة لحام ولأم مختلفة لوصل المواد معاً[95]، فإن القرار المهم الواجب اتخاذه هو: ما هي طريقة الوصل التي يجب استخدامها؟ يعتمد الجواب على كثير من العوامل، ومنها الخواص التي يجب تحقيقها في مكان الوصل، والخواص التي يجب تحقيقها في المعادن الأساسية بالقرب من مكان الوصل (المنطقة المتأثرة بالحرارة)، وحجم الهيكل الذي سوف يجري تجميعه، والخواص الفيزيائية الحرارية للمواد التي يجري وصلها.

من الناحية المثالية، يجب أن تتصف الوصلات المكوَّنة باللحام أو اللأم بخواص مماثلة لخواص المواد الأساسية. يضاف إلى ذلك أن سيرورة الوصل يجب ألا تغيِّر خواص المواد الأساسية التي يجري وصلها. لكن غالباً، وبسبب طبيعة خصائص سيرورة الوصل، تتغيّر بعض الخواص من منطقة في الوصلة إلى أخرى تغيّراً كبيراً. فأثناء عملية الوصل، تتعرض منطقة الوصلة، أو المنطقة القريبة منها،

وأحياناً كل الهيكل الذي يجري تجميعه، إلى دورات حرارية. ونتيجة تلك الدورات الحرارية، يمكن للبنية الميكرويّة والخواص في مناطق الوصلة المختلفة أن تصبح مختلفة. ومن المرجَّح جداً أيضاً أنه سوف يحصل في الوصلة توزُّع معقد للإجهادات المتبقّية يؤدّي إلى تقصير عمر الوصلة[96]. إن مقادير التغيّرات، وماهية الخواص التي سوف تتغير، تعتمد على سيرورة الوصل، وعلى المواد الموصولة، وعلى معادن الحشوة المستخدمة في الوصل.

بقبول حقيقة أن تغيُّراً ما في الخواص سوف يحصل عبر الوصلة، يجب القيام بمقايضة بشأن خواص الوصلة التي يجب أن تتوافق مع خواص المواد الموصولة، وماهية خواص المادة الموصولة التي يجب الحفاظ عليها. واعتماداً على وظيفة الكتلة التي يجري تجميعها، يُتخذ قرار بشأن الخواص المتوافقة (كالمقاومة والمتانة والتعب ومقاومة التآكل). ففي حين أن خاصية ما تكون متوافقة، يمكن لخواص أخرى أن تتغيّر عبر مناطق الوصلة. وفي حالة الختشيات، من المنطقي أن نتوقع أن تكون «الخاصية» التي يجب أن تتوافق بها كل من الوصلة والمادة الأساسية هي مفعول تذكُّر الشكل.

### فارق جوهري

الخاصتان اللتان يجب أن تكونا متوافقتين معاً في المعدن الأساس ومنطقة الوصلة هما التركيب الكيميائي والبنية الميكرويّة، فهما اللتان تُحدِّدان المفعول الختشي. وهذه هي النقطة الجوهرية التي يختلف فيها وصل الختشيات معاً عن وصل الخلائط الإنشائية العادية، ومنها خلائط الفولاذ والألمنيوم والتيتانيوم.

في الخلائط الإنشائية الأخرى، يمكن تحقيق توافق خواص المقاومة والمتانة والتعب ومقاومة التآكل برغم الفوارق في التركيب الكيميائي والبنية الميكرويّة بين المعدن الأساس ومناطق

الوصلة[95، 97-101]. فالمرونة في استخدام تراكيب وبُنى ميكرويّة مختلفة في منطقة الوصلة والمعدن الأساس والمناطق المتأثرة بالتسخين تزيد من احتمال صنع وصلات ناجحة. وحين وصل مواد إنشائية، غالباً ما تكون معادن الحشوة المستخدمة في اللحام مختلفة بتركيبها الكيميائي عن المعدن الأساس، ومع ذلك يمكن تحقيق وصلات مُرضية[95-97، 101]. ومن الأمثلة الجيدة بهذا الخصوص لحام الفولاذ [95]، حيث تُجعل نسبة الكربون في معدن الحشوة منخفضة مقارنة مع نسبتها في المعدن الملحوم، وذلك لتجنب تكوُّن المرتنزيت الذي قد يؤدّي إلى التصدّع.

وفي حالة لحام خلائط الألمنيوم ـ زنك ـ مغنيزيوم، يمكن تحقيق خواص ممتازة من حيث مقاومة الشدّ والمتانة إزاء التكسُّر والتعب باستخدام معدن حشوة من الألمنيوم ـ مغنيزيوم[98، 99، 101]. وفي حالة وصلات لحام التيتانيوم، يمكن تحقيق خواص ميكانيكية مُرضية برغم تغيُّر البنية الميكرويّة من منطقة إلى أخرى في الوصلة[95، 100].

إن ما يجب الإشارة إليه في الأمثلة السابقة هو أنه يمكن تحقيق وصلات ناجحة برغم اختلاف التراكيب الكيميائية والبُنى الميكرويّة في ما بين معدن اللحام والمناطق المتأثرة بالتسخين والمعدن الأساس في منطقة الوصلة. أما في حالة الختشيات، فإن هذا غير قابل للتحقيق. فتوافق التراكيب الكيميائية والبُنى الميكرويّة ودرجات حرارة التحوُّل الطَوري مهم جداً، إلى جانب توافق الخواص الميكانيكية ومقاومة التآكل.

ووصل الختشيات باستخدام سيرورات اللحام العادية شديد الصعوبة لأنه من غير الممكن التحكّم بتغيّرات البنيوية الميكرويّة والتركيب الكيميائي في منطقة اللحام بالدقة التي تتطلبها الختشيات بسبب طبيعة خصائص السيرورة نفسها.

## لحام خلائط تذكر الشكل الاندماجي

كانت ثمة محاولات لاستخدام سيرورات اللحام الاندماجي، ومنها اللحام بغاز قوس التنغستين، أو بالحزمة الليزرية أو الإلكترونية لوصل خلائط النيكل ـ تيتانيوم. ومن المشاكل التي ظهرت في أثناء عملية اللحام الاندماجي التهشُّش بسبب انحلال الأُكسجين والهيدروجين والنيتروجين، اختفاء المرونة الفائقة ومفعول تذكُّر الشكل في المناطق المتأثرة بالتسخين، وتكوُّن مركَّبات متعدّدة المعادن من قبيل $Ti_2Ni$ أو $TiNi_3$ الهشة التي لا تتذكَّر الشكل[105ـ102، 11، 10].

لقد لحّم أكاري (Akari) وزملاؤه[105، 103] صفيحة نيكل ـ تيتانيوم سماكتها 3 ملم باستخدام ليزر ثاني أُكسيد الكربون قدرته 10 كيلو واط. ومع أن وصلة اللحام بالليزر أبدت مفعولاً ختشياً ومرونة فائقة جيدين، إلا أن مقاومة الوصلة للشدّ كانت منخفضة. فقد حصل انكسار في المعدن الملحوم عند مركز الوصلة، وعُزي ذلك إلى حجم الحُبيْبة الخشن في منطقة الاندماج. بناءً على ذلك، وعلى أعمال أخرى سابقة، يبدو أن اللحام الاندماجي لختشيات من قبيل النيكل ـ تيتانيوم سوف يكون صعباً.

وأجرى معهد إديسون للحام[106، 10] (Edison Welding Institute) دراسة للحام النيتينول (Nitinol) مع معادن حديدية أخرى مثل الفولاذ غير القابل للصدأ. إن هذا الجمع بين المعادن مُغرٍ لأنه يتيح للمصنِّع أن يستخدم النيتينول الغالي الثمن لعناصر التصميم المهمة فقط، ومنها الجسر الأنفي والأجزاء الصدغية في النظارات. وقد استُقصيت طرائق وصل بديلة أخرى واستُخدمت لوصل النيتينول بالفولاذ غير القابل للصدأ، ومنها اللحام أو اللأم أو التثبيت الميكانيكي أو اللصق بلواصق عضوية، إلا أن أيّاً منها لم يكن حلاًّ

بسيطاً، علاوةً على وجود مثالب فيها جميعاً من حيث مقاومة الشدّ أو التطبيق، أو من حيث تأثيرها في أداء النيتينول.

إلا أن اللحام الاندماجي الناجح للنيتينول مع نفسه، وخصوصا بواسطة الليزر، قد ترسَّخ ووُثِّق جيداً خلال السنوات العشر الماضية. وقد أصبح لحام النيتينول عملية سهلة نسبياً بعد توفّر الإجراءات المناسبة وطرائق اللحام العالية الجودة. إلا أنه تبيّن أن لحام النيتينول مع معادن أخرى اندماجياً، ومن بينها الفولاذ غير القابل للصدأ، هي عملية صعبة. وهذا ناجم عن نزوع التيتانيوم إلى تكوين أطوار هشة متعدّدة المعادن مع معظم المعادن الأخرى. لكن في حالة المعادن الحديدية، يتكوَّن الطَوران TiFe و$TiFe_2$. ومع ذلك، يبقى لحام النيتينول مع الفولاذ غير القابل للصدأ تركيباً مرغوباً فيه في كثير من التطبيقات، ومنها التجهيزات الطبية.

وجرى النظر أيضاً في طرائق لحام متنوعة منها لحام المقاومة (Resistance welding)، واللحام الاحتكاكي (Friction Welding)، مع استخدام مادة انتقالية. من بعض الطرائق الواعدة هنا تقنيات اللحام بالتطريق في الحالة الصلبة (Solid-State Forge Welding)، ومنها اللحام الاحتكاكي ولحام المقاومة. في لحام الحالة الصلبة، يتكوَّن رابط من خلال تطبيق التسخين والضغط، لكن من دون حصول انصهار واسع النطاق للمعادن الملحومة. إن غياب السائل يمنع، أو يقلِّص تكوُّن الأطوار الهشّة المتعدّدة المعادن إلى حده الأدنى، ويمكن أن يؤدّي إلى وصلة جيدة. إلا أن سيرورات اللحام هذه تقتصر عادة على وصلات ذات أشكال هندسية أو أبعاد معيّنة. لذا، وبرغم الجدوى الظاهرية للحام بالتطريق، فإن تطبيقاته تبدو محدودة إلى حد ما.

ومن خلال برنامج بحث داخلي، طوَّر معهد إديسون للحام[106] سيرورة لحام اندماجي أسهل استخداماً وأكثر شمولية لوصل النيتينول

بالفولاذ غير القابل للصدأ. وقد تجلّت نتائج هذا العمل الناجح في وصلات لحام ليزري ناجح لسلكين مجاورين. حيث ازدادت مقاومة الشدّ في الوصلة من 0 حتى يصل إلى 621 ميغا باسكال. لكن ازدياد المقاومة هذا ترافق بانخفاض كبير في صلابة معدن اللحام من 900 حتى 450 رز (Vickers). أما وظيفياً، فقد كانت مقاومة اللحام للشدّ كافية للسماح بحني شديد فائق المرونة للنيتينول في منطقة اللحام. وهذا ليس مقتصراً على وصلات النيتينول مع الفولاذ غير القابل للصدأ فقط، إذ أُجريت تحسينات مشابهة في وصلات بين الفولاذ المكربن والتيتانيوم.

## لحام الختشيات في الحالة الصلبة

إن عمليات اللحام في الحالة الصلبة، ومنها اللحام الاحتكاكي ولحام المقاومة واللحام التغلغلي مغرية بطبيعتها لوصل الختشيات معاً لأنها يمكن أن تحقّق وصلات بقليل من التغيُّرات في البنية الميكرويّة، إن كانت ثمة تغيّرات. ويمكن تحقيق الوصلات عند درجات حرارة منخفضة نسبياً مقارنة باللحام الاندماجي، ومن دون حدوث انصهار للمعادن التي يجري لحامها.

وأجرى معهد إديسون للحام برنامج بحث لاستقصاء إمكان استخدام لحام المقاومة لوصل النيتينول مع نفسه ومع التنغستين[10]. وقد أبدى النيتينول الملحوم بالمقاومة مرونة فائقة ممتازة من دون أي معالجة إضافية بعد اللحام. في سيرورة لحام المقاومة، يمكن أن يحصل بعض الانصهار الموضعي مع تشكّل شذرّات اندماجية عند الملتقيات. ويمكن لمناطق الانصهار الموضعي أن تتصلَّب عند معدّلات التبريد العالية، وهذا يمكن أن يؤدّي إلى بنية ميكرويّة لا تتذكَّر الشكل. لكن الانتقاء الصحيح للمعالجة في ما بعد اللحام يمكن أن يمنع تكوُّن البُنى الميكرويّة التي لا تتذكَّر الشكل. لذا ثمة

حاجة إلى بحث إضافي في هذا الموضوع قبل اتخاذ قرارات بشأن إمكان تطبيق لحام المقاومة لوصل الختشيات.

ونُفِّذت وصلات جيدة لقضبان من النيكل ـ تيتانيوم أقطارها تساوي 6 ملم باستخدام اللحام الاحتكاكي[11]، حيث استُخدمت قيمة للضغط لا تقل عن 127.8 ميغا باسكال في عملية اللحام. وباستخدام المعالجة الحرارية بعد اللحام، لم يكن إلا قليل من التغيّرات في درجات حرارة التحوُّل الطَوري في وصلة اللحام مقارنة بتلك التي للمعدن الملحوم. إن أهم نتيجة لهذه التجربة هي أن خصائص تذكُّر الشكل في كل من المعدن الملحوم ووصلة اللحام كانت متشابهة.

يبدو اللحام الاحتكاكي عملية قابلة للتطبيق لوصل الختشيات، إلا أن قيود الأشكال الهندسية للأجزاء التي سوف تُوصل معاً يمكن أن تمثل مشكلة في استخدامه. بعد التطورات الأخيرة في تقانة اللحام الاحتكاكي الخطي (Linear Friction Welding)، يمكن استخدام اللحام الاحتكاكي لوصل الأجزاء غير المتناظرة محورياً[94]. في اللحام الاحتكاكي الخطي، تتولّد حرارة الاحتكاك من خلال التحريك الاهتزازي الانسحابي لملتقيات القطعتين بمطال صغير عند تردّد ملائم. وثمة نوع آخر من اللحام الاحتكاكي هو اللحام الاحتكاكي العطالي (Inertia Friction Welding)، وفيه تُستخدم قوة محورية شديدة في أثناء اللحام. تؤدّي الدورة الحرارية السريعة، والقوة المحورية الشديدة المقترنة باللحام الاحتكاكي العطالي إلى طرد المعدن المتلدن، نتيجة التسخين والتشوّه، من ملتقى اللحام[107]. ويعطي اللحام الاحتكاكي العطالي وصلات جيدة أيضاً بسبب طرده طبقات الأُكسيد وللمناطق المتأثرة بالتسخين والتشوّه الضارة بمفعول تذكُّر الشكل.

أما اللحام التغلغلي، فيحقِّق الوصل بتطبيق ضغط عند درجات

حرارة مرتفعة من دون تشويه جهري[(94)]، حيث يُحشر معدن حشوة بين السطحين الملحومين. يمكن استخدام هذا النوع من اللحام لوصل النيكل ـ تيتانيوم.

من طرائق اللحام في الحالة الصلبة الأخرى التي يمكن استخدامها في وصل الختشيات اللحام الصدمي (Percussion welding) واللحام بالأمواج فوق الصوتية.

## طرائق أخرى للوصل

ثمة طريقة لحام مسجلة براءة اختراع[(108)] لوصل النيتينول مع مواد أخرى يُستخدم فيها مساعد على الانصهار يحتوي على مادة هالوجينية تزيل أُكسيد التيتانيوم من سطح النيتينول، وتُرسِّب عليه غشاءً معدنياً لمنع أكسدة جديدة. وتُوضع مادة من قبيل القصدير ـ فضة على السطح المُقَصْدَر لإزالة المساعد على الانصهار. ويمكن أيضاً تطبيق عنصر آخر على اللحام المصهور لتكوين الوصلة، لكن ليس هناك ادعاء بأن مفعول تذكُّر الشكل سوف يبقى في الوصلة، مع أنه يمكن القول إن مفعول تذكُّر الشكل الموجود في المعدن الأساسي سوف يبقى. ويبدو أن هذا النوع من الوصل يمكن أن يُستخدم فقط حينما تكون ثمة حاجة للاستمرارية الميكانيكية من دون الحاجة إلى مفعول تذكُّر الشكل في الوصلة.

وفي طريقة وصل أخرى مسجلة اختراعاً تُمسَك قطعة ضمن حامل على نحو يكون فيه معظمها خارج الحامل. ويُصهر منبع حراري الجزء المحمول، وبعدئذٍ يُدخل النيتينول ضمن الكتلة المنصهرة. لقد وُجد بعد التبريد أن الوصلة تتصف بمقاومة شدّ جيدة وبهشاشة منخفضة. ويبدو أنه يمكن استخدام هذه الطريقة لوصل النيتينول مع الفولاذ غير القابل للصدأ، من وجهة النظر الميكانيكية على الأقل، وهي من متطلبات تصنيع أسلاك التوجيه الطبية.

## الربط بالطَور السائل العابر

يُستخدم الربط بالطَور السائل العابر (Transient Liquid Phase Bonding) لوصل منظومات مواد متقدمة متنوعة من قبيل الخلائط الفائقة القائمة على النيكل والمركَّبات المتعدّدة المعادن. في هذه الطريقة، توضع حشوة معدنية بين سطحي المعدن المتماسين، وتُسخَّن المجموعة بأسرها حتى درجة حرارة الربط. تتحول الحشوة المعدنية إلى سائل عند درجة الحرارة تلك، ويعود الغشاء السائل إلى التصلُّد المتساوي الحرارة عند إبقاء الوصلة عند درجة الحرارة تلك. ونظراً إلى أنه من المهم في وصل الختشيات تكوين وصلة لها البنية الميكرويّة نفسها التي للمادة الملحومة، مع الاحتفاظ بمفعول تذكُّر الشكل، فإن الربط بالطَور السائل العابر مرشح قوي لوصل الختشيات.

وحاولت مجموعة بحث لدى جامعة Auburn وصل نيكل ـ تيتانيوم مع نيكل ـ ألمنيوم(102) بهذه الطريقة. وتبيَّن في أثناء هذا الاستقصاء أن طبقة من $Ni_2AlTi$ تكوَّنت على خط الوصل. إن من المشاكل التي تظهر في لحام النيكل ـ تيتانيوم والنيكل ـ ألمنيوم بالطَور السائل العابر تكوُّن أطوار ثانوية يمكن ألاّ تمتلك مفعول تذكُّر الشكل، وانتشار التيتانيوم والألمنيوم من المادة التي يجري وصلها إلى خط الربط. لكن بالاختيار الصحيح للحشوة المعدنية وللمعالجة في ما بعد الوصل، يمكن درء هذه المشاكل. ويمكن لهذه الطريقة أن تكون صالحة لوصل الختشيات، لكن نجاحها يعتمد على استمثال موسطات كل خليطة على حدة.

## أعمال للمتابعة

يُعتبر وصل الختشيات باستخدام طرائق الوصل المعتادة شديد الصعوبة لأنه من غير الممكن التحكُّم في تغيّرات التركيب الكيميائي والبنية الميكرويّة ودرجات حرارة التحوُّل الطَوري اللازمة للاحتفاظ

بمفعول تذكُّر الشكل. ويُعدُّ اللحام في الحالة الصلبة، مثل لحام المقاومة أو اللحام الاحتكاكي، من الطرائق الواعدة. أما طرائق الحالة الصلبة الأخرى، من قبيل اللحام الاحتكاكي العطالي واللحام الصدمي، فهي جديرة بالدراسة.

أما الربط بالطَور السائل العابر، مع المعالجة والقصدرة في ما بعد اللحام باستخدام صُهورات خاصة، فيبدو بديلاً ممكن التطبيق لوصل الختشيات معاً.

**التشكيل الفائق اللدانة**

اللّدانة الفائقة هي ظاهرة تُبدي فيها المادة استطالة أكبر عند درجات الحرارة المرتفعة. بكلمات أخرى، تُبدي المادة الفائقة اللّدانة مطاوَعة ممتازة في الظروف الملائمة، موفرةً بذلك مزايا عظيمة لتشكيل المواد.

من بين عدد من تقنيات التشكيل الفائق اللدانة هناك التشكيل بالنفخ (Bulge Forming) والتشكيل بالتخلية، والتشكيل الفائق اللدانة بالربط التغلغلي، التي استُخدمت جميعاً على نطاق واسع في الصناعة الجوية الفضائية. وفي مجال خلائط النحاس، درس بعض الباحثين خواص الشدّ في خلائط النحاس الفائقة اللّدانة[109]. إلا أنه لم تُجرَ إلا بعض الدراسات بشأن خواص تشكيل صفائح خلائط النحاس الرقيقة. وقام هْسُو (Hsu) ووانغ[94] (Wang) بدراسة للسلوك الفائق اللّدانة في ختشيات النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم ـ زركونيوم.

جرى في هذه الدراسة استقصاء لمفاعيل درجة الحرارة والضغط في التشكيل بالضغط لصفيحة من خليطة نحاس ـ 26.5 في المئة زنك ـ 4 في المئة ألمنيوم ـ 1 في المئة زنك (نسب وزنية) في ظروف النفخ الحر باستخدام غاز الأرغون. وكانت المفاعيل التي جرى تقييمها ارتفاع القبة

عند قطبها، والسماكة النوعية (نسبة السماكة الناتجة إلى السماكة الأصلية) وعامل الترقُّق (نسبة السماكة الناتجة إلى السماكة الوسطية). وبينت النتائج ما يأتي:

**1** ـ يزداد ارتفاع القبة، ومشتقه dh/dt، مع ازدياد درجة الحرارة أو الضغط.

**2** ـ يمكن لمعدل الانفعال الكبير في العيّنات المنفوخة بضغط عالٍ عند درجة حرارة ثابتة، أن يفسِّر سبب كون dh/dt، عند ضغط التشكيل العالي، أكبر منه عند ضغط أخفض.

**3** ـ تتناقص السماكة النوعية مع ازدياد نسبة الارتفاع. يُضاف إلى ذلك أن السماكة النوعية عند القطب تتناقص مع زيادة درجة الحرارة أو الضغط.

**4** ـ يتغير تدرج تشوّه السماكة مع زيادة الارتفاع النسبي، ويتزايد تدريجياً مع ازدياد درجة الحرارة والضغط.

**5** ـ ينخفض عامل الترقُّق مع ازدياد الارتفاع النسبي. ويصبح هذا التناقص أكثر جلاء مع ازدياد درجة حرارة التشكيل، أو ضغطه.

## التشكيل

جرى أخيراً تطوير بوليمر يتذكَّر الشكل (Shape Memory Polymer) لدى الشركة Mitsubishi Heavy Industries[110]. يُعطي هذا البوليمر مادة تُستخدم في خوذة دراجة الطفل يمكن إعادة تشكيلها في المنزل لتكييف حجمها مع نمو الطفل. ويمكن استخدامها أيضاً في وعاء طعام يستطيع المعاقون جسدياً إعادة تشكيله لتحقيق حاجاتهم المختلفة. تلك المادة هي البولي يوريثان (Polyurethane) «الذكي» المسجّل اختراعاً والسهل المعالجة. فضمن ظروف معيّنة يمكن تحقيقها تبعاً للحالة، يمكن لبوليمر تذكُّر الشكل هذا أن يغيّر شكله وقساوته، ثم العودة إلى وضعه الأصلي إن كان

ذلك مطلوباً. أما تغيير الشكل فيحصل عند تسخين المادة، في حين أن التبريد السريع يمكِّنها من الاحتفاظ بشكلها. وإذا أُعيد تسخينها، تذكَّرت شكلها الأصلي وعادت إليه.

تباع تلك المادة على شكل كرات صغيرة أو محلول أو سائل لتسهيل تركيبها. ويمكن تشكيلها باستخدام التجهيزات العادية المستعملة في القولبة بالحقن أو البثق أو التغشية أو الصبّ لتكوين البوليمر الختشي. وثمة منتجات منها متوافرة نصف مشكَّلة، ومنها الرغوة والأقراص الميكرويّة. وقد اجتازت هذه المادة أيضاً اختبارات مخبرية مهمة بخصوص توافقها الحيوي لاستخدامها في الأدوات الطبية.

## التشغيل

تشتهر الختشيات بسمعتها السيئة من حيث صعوبة تشغيلها. فتشغيلها بطرائق التشغيل المعهودة كالخراطة والتفريز والثقب واللولبة يؤدّي إلى الاهتراء السريع لأدوات التشغيل[111]. أما أنجح تقنيات تشغيلها حالياً فهي جلخ السطوح والتفريز والتشغيل بالانفراغ الكهربائي (Electrical Discharge Machining) (EDM) والقص بالليزر. أما تشكيلها، فيُجرى بتدريبها على التكوُّن عند درجات حرارة عالية تساوي 500 مْ تقريباً عادةً. وخلافاً لمعظم المواد العادية التي يمكن تشكيلها على البارد، فإن الختشيات يجب أن تُعطى الشكل المطلوب وأن تُبقى فيه، ثم تُعرَّض إلى درجات الحرارة المرتفعة.

## التصميم لتسهيل التجميع

التصميم الذي يسهِّل التجميع هو أيضاً من الاعتبارات التصنيعية المهمة. ويمثل تثبيت الختشيات مع المواد الأخرى تحديات إضافية

تتضمن الربط والوصل. ونظراً إلى أن الختشيات مصممة لتقبل انفعالاً بمقدار 8 في المئة، في حين أن انفعال المواد الأخرى يقل عن 1 في المئة، فإن المواد العادية يمكن أن تتكسر حين وصل النوعين معاً على نحو صلب. وهذا غالباً ما يسبّب مشاكل في المواد الختشية المطلية أو المصفَّحة، لأن مادة الطلاء على الختشية سوف تتصدّع وتتقشر على الأغلب في أثناء الانفعال.

## تشغيل وتصنيع تجهيزات الختشيات الميكرويّة

سيرورات تصنيع النظم الإلكترونية الميكانيكية الميكرويّة القائمة على السليكون[112، 113].

مثّلت تقانات السليكون والسيرورات المقترنة بها فتوحات علمية كبرى في الإلكترونيات والمُحِسَّات والمفعِّلات الميكرويّة. فالسيرورات القائمة على السليكون توفِّر طريقة فريدة لتطوير المفعِّلات الميكرويّة وتصغيرها وإنتاجها على نطاق واسع. هذا إضافة إلى أن طرائق الإنتاج تلك متوازية إلى حد بعيد، وإلى أنها تسمح بالمعالجة على دفعات. إلا أن فيها بعض المحدوديات:

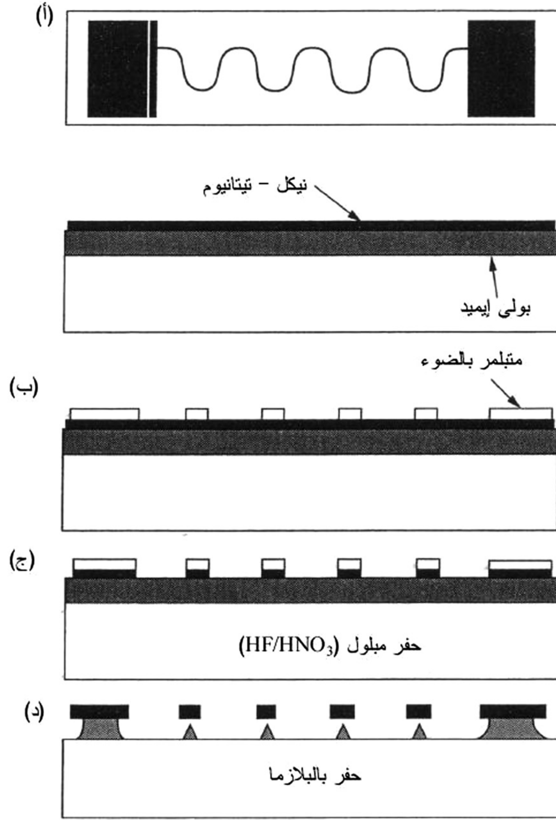
- تقانات البناء المكروي السليكونية هي تقانات مسطحة.
- نفقات الاستثمار التقاني فيها مرتفعة جداً.
- طرائق التصنيع مقتصرة عادةً على بُنى ذات نسب بُعدية محدودة.

يمكن توضيع خلائط النيكل ـ تيتانيوم والنيكل ـ تيتانيوم ـ س (حيث س يمكن أن تكون نحاساً أو هافنيوم أو بالاديوم) على مختلف الركائز، ومنها السليكون أو أُكسيد السليكون ($SiO_2$) أو التيتانيوم. إلا أن ركيزة السليكون تُستبعد عادة بسبب إمكان تكوُّن السيليسيد (SiNi) في أثناء التبلور على غشاء النيكل ـ تيتانيوم الرقيق. أما أكثر الطرائق شيوعاً لإنتاج أغشية النيكل ـ تيتانيوم الرقيقة فهي

الترذيذ الماغنتروني، وثمة وصف تفصيلي لهذه السيرورة، إضافة إلى خواص الأغشية الرقيقة التي تُنتَج بها، في المرجع 113. وثمة سيرورات أخرى، من قبيل التوضيع بالتبخير الجزئي[114] (Flash Evaporation) والحفر الليزري[115] (Laser Ablation) والمعالجة المتعدّدة الطبقات[116]، يمكن استخدامها أيضاً لإنتاج الأغشية الرقيقة.

تُحفر أغشية النيكل ـ تيتانيوم عادة باستخدام محاليل Hf/ $HNO_3$/ $H_2O$. ووفقاً لنتائج ماشينو[115] (Machino)، يسمح محلول HF: $HNO_3$: $H_2O$ =1: 1: 4 بالحفر الانتقائي لغشاء نيكل ـ تيتانيوم مرسَّب على ركيزة سليكونية. ويمكن استخدام طرائق تصنيع مختلفة تبعاً لنوع المفعِّل المُراد صنعه. لكن عندما يكون المفعِّل حر الحركة، فإن ثمة حاجة إلى طبقة وسيطة تسمّى الطبقة الذوَّابة (المهدورة) (Sacrificial Layer).

يبيّن الشكل 4 ـ 6 طريقة لإنتاج عنصر ميكانيكي مكروي حرّ الحركة ممثل بنابض[117]. في الخطوة الأولى، تُرسَّب طبقة من البولي إيميد (Polyamide) بالتغشية التدويمية ( Spin Coating) ثم تصلَّد. وفي الخطوة الثانية يُرسَّب غشاء رقيق من النيكل ـ تيتانيوم على طبقة البولي إيميد. وفي الخطوة اللاحقة، يُرسَّب غشاء رقيق واقٍ من الضوء بالتغشية التدويمية على غشاء النيكل ـ تيتانيوم الرقيق. ثم يُشوى الغشاء الواقي ويُشكَّل، ثم يُظهَّر لكشف أجزاء معيّنة من طبقة النيكل ـ تيتانيوم انتقائياً. ثم يُحفر غشاء النيكل ـ تيتانيوم. وأخيراً، تُحرَّر البنية بواسطة الحفر الشاردي التفاعلي لطبقة البولي إيميد الذوَّابة.




**الشكل 4 ـ 6: سيرورة تصنيع مفعِّل ميكروي مكوَّن من غشاء رقيق. (أ) توضيع الطبقات، (ب) توضيع الواقي من الضوء وتكوين الأشكال، (ج) حفر مبلول لطبقات خليطة تذكُّر الشكل، (د) حفر بالبلازما لطبقة البولي إيميد[17].**

واقترح آخرون[118] ترسيب أغشية النيكل ـ تيتانيوم فوراً قبل إزالة الطبقة الذوّابة. هنا ترسَّب طبقة ذوّابة من الكروم على ركيزة $SiO_2$. وترسَّب طبقة من البولي إيميد على طبقة الكروم بالتدويم، ثم ترسب طبقة أخرى من الكروم على طبقة البولي إيميد. وتُشكَّل طبقة الكروم العليا بالطباعة الضوئية، ثم تحفر وهي مبلَّلة. وتُحفر طبقة

البولي إيميد عمودياً ببلازما الأُكسجين باستخدام طبقة الكروم القَبْلية التشكيل كقناع. ثم ترسَّب طبقة النيكل تيتانيوم، التي تقل سماكتها عن سماكة طبقة البولي إيميد. وفي الخطوة الأخيرة تُزال طبقة البولي إيميد بالحفر المبلول، ويُحرَّر الجزء الميكانيكي بالحفر المبلول لطبقة الكروم. ونظراً إلى أن طبقة النيكل ـ تيتانيوم لا تُحفر أبداً، فإن النسبة البُعدية للبنية غير محدودة نظرياً.

يُستخدم في كثير من التطبيقات، ومنها الصمّامات الميكرويّة، مفعِّلات غشائية أو ذات أشكال شبيهة بالأحياء (Biomorph) من النيكل ـ تيتانيوم على ركيزة $SiO_2$. يمكن صنع هذه البنية باستخدام سيرورة اقترحها وولف (Wolf) وزملاؤه[119]، وفيها تُغشَّى ركيزة سليكونية، عليها طبقة من أُكسيد السليكون $SiO_2$ من الجانبين، بغشاء واقٍ من الضوء وتُشوى بهدوء. وتوضع أشكال المفعِّل على الجانب الخلفي من الغشاء الواقي الذي يُظهَّر مؤدياً إلى ظهور السليكون في الأجزاء غير المغطاة بالأشكال، وتَنتُج من ذلك أنماط شبيهة بالنوافذ. ثم يُحفر السليكون، ويُزال معظم ما وراء النافذة تقريباً. ثم تُزال الطبقة الأمامية باستخدام مادة كيميائية آكلة للأُكسيد. وحينما تكون ثمة رغبة في بُنى ذات أشكال شبيهة بالأحياء، لا تُزال طبقة أُكسيد السليكون الأمامية، ويُرسَّب النيكل ـ تيتانيوم عليها مباشرة.

### التشغيل الليزري

يمكن استخدام الليزرات لتفريز وقص العناصر الختشية، وتُستخدم في ذلك عادةً ليزارت النيوديميوم ـ ياغ Nd-Yag. تُثبَّت القطعة المراد تشغيلها على منصة انسحابية الحركة ذات محورين تحت عدسة تبئير ثابتة. وتُضاف أحياناً منصة دوّارة من أجل قص الأنابيب. ويُبأَّر الليزر على القطعة، ويُستخدم دفق غازي إضافي لتصريف المادة المنصهرة. تعتمد دقة القطع على مقاس القطعة وعلى

طبيعة مادتها، ومن الممكن قص صفائح تختلف سماكاتها بين بضعة ميليمترات و0.005 مم.

وتتغير مساحة بقعة الليزر تبعاً لسماكة القطعة. في حالة النيكل ـ تيتانيوم، بيَّنت النتائج أن أصغر قطر للبقعة يختلف من 0.02 ملم لصفيحة سماكتها 0,01 مم، حتى 0.08 ملم لصفيحة سماكتها 1 مم. يُعدُّ التشغيل الليزري طريقة فاعلة لتشغيل مواد النيكل ـ تيتانيوم في حالة حجم الإنتاج الصغير حتى المتوسط، وفي إعداد النماذج.

## تطبيقات الختشيات

صُمِّمت الختشيات وصُنعت لاستخدامها في تطبيقات وتجهيزات مختلفة منذ اكتشاف مفعول تذكُّر الشكل أول مرة في ثلاثينيات القرن العشرين. إلا أن معظم أنشطة التصميم هذه ابتدأ باكتشاف النيتينول في عام 1962، ومنذئذٍ، جرى تسجيل أكثر من 000 10 براءة اختراع لتطبيقات تُستخدم الختشيات فيها[120].

جرى تصميم وتصنيع وتسويق تطبيقات تُستخدم في كل منها واحدة من خواص الختشيات الفريدة في شتى أنحاء العالم.

تتضمن أمثلة التطبيقات التالية بعض المناقشات بخصوص خيارات تصميم الختشيات والمحدوديات التي تُميِّز موادها وسلوكها. وقد صُنِّفت هذه الأمثلة تبعاً للصناعة التي تُستخدم فيها بغية عرض التنوُّع الواسع للتطبيقات الختشية.

### التطبيقات الجوية والفضائية

كانت الصناعة في المجالين الجوي والفضائي سبَّاقة في تطوير واستخدام كثير من الأفكار والتطبيقات الأولية التي تتضمن الختشيات.

تُستخدم المواد الختشية في هذه الصناعة للاستفادة من خواص لناحية نسبة القدرة إلى الكتلة العالية، والعمل التفعيلي المثالي في ظروف انعدام الثقالة. إن التصاميم التي تستخدم هذه الخواص تستعيض عن التجهيزات الثقيلة المعقّدة التي كانت مستخدمة في السابق، بتجهيزات أخفّ وزناً وأبسط تصميماً وأعلى وثوقية.

**قارنات الأنابيب الهيدروليكية طراز ®Cryofit**: كانت القارنات المصنوعة من الختشيات أول تطبيق تجاري ناجح لتلك المواد (الشكل 4 ـ 7). في عام 1969، طوَّرت شركة Raychem Corporation قارنات أنابيب هيدروليكية تنكمش لتصبح بالمقاس المناسب للاستخدام في المقاتلات النفاثة F-14 التي صنعتها شركة Grumman Aerospace Corporation. وقد صُنعت هذه القارنات من خليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ حديد درجة حرارة تحوُّلها الطَوري المرتنزيتي تقل عن ـ 120 مْ، وشُغِّلت عند درجة حرارة الغرفة بقطر داخلي يقل بـ 4 في المئة تقريباً عن القطر الخارجي للأنبوب الذي صُمِّمت لوصله. وحين تبريد القارنة إلى ما دون ـ 120 مْ بالنيتروجين السائل، تُجبر على اتخاذ قطر أكبر بـ 4 في المئة من قطر الأنبوب بانفعال داخلي كلي يساوي 8 في المئة تقريباً. وعندما تُسخَّن إلى درجة أعلى من درجة حرارة تحوّلها الطَوري، يتناقص قطرها لتصبح قارنة للأنبوبين تامة الإحكام[116].

ما زال هذا التطبيق الختشي لاسترجاع الشكل المقيَّد يمثّل نجاحاً تجارياً ومالياً. فبرغم صعوبات تبريد القارنات حتى درجة حرارة النيتروجين السائل لحفظ التمدُّد، فقد رحّبت الصناعة الجوية والفضائية بكثير من مزايا هذه القارنات التي تفوق تلك التي لتقنيات وصل الأنابيب الأخرى من قبيل اللحام واللأم. فتركيب القارنات سهل، وأقل تكلفة، ولا يتطلب مهارة عالية. واستبدال القارنات

والخطوط الهيدروليكية بسيط، إضافة إلى انتفاء إمكان تلدُّن الأنابيب وتضررها المعهود في اللحام واللأْم[119].



**الشكل 4 ـ 7: تجهيزات ختشية. من أعلى اليسار إلى اليمين وفقاً لحركة عقارب الساعة: آلية إخراج بطاقة ذاكرة من حواسيب محمولة؛ قارنات أنابيب هدروليكية من الشركة ®Cryofit؛ موصل كهربائي طراز ®Cryocon؛ آلية تحرير غطاء حاوية القمامة حين اندلاع النار فيها (نُشرت هذه الصورة بناء على موافقة الشركة Shape** .Memory Applications, Inc.)

أما أنواع الفولاذ غير القابل للصدأ التي جرى تطويرها أخيرا، والتي تحتوي على 4.4 ـ 6.3 في المئة نيكل[122]، فيمكن أن تُوسِّع سوق المواد الختشية، وفق ما قاله شنكسو زهاو (Chenxu Zhao)، الباحث لدى جامعة جياوتنغ في الصين. إن أنواع الفولاذ هذه أشدّ مقاومة للتآكل وأسهل استخداماً، وفوق ذلك، أقل تكلفة بكثير من الختشيات المستخدمة حالياً.

ووجد الباحثون أن بعض أنواع الفولاذ (FeNiC, FeMnSi, FeMnSiCrNi) تخضع إلى تحولات طورية غير مرنة حرارياً، إلا أنها تُبدي مفعولاً ختشياً جيداً. فهذه المواد تعتمد على تحوّلات طَورية تتحرّض بالإجهاد لتسترجع شكلها. وانفعالها القابل للانعكاس أقل من ذاك الذي للختشيات العادية (3 في المئة مقارنة بـ 8 في المئة في النيكل ـ تيتانيوم و6 في المئة في الخلائط القائمة على النحاس)، إلا أنها قوية بما يكفي لضمان مزيد من البحث عن تطبيقات تجارية لها. يقول زهاو إن قارنات الأنابيب هي أفضل تطبيق عملي لفولاذ تذكُّر الشكل غير القابل للصدأ. والقارنات التي تنكمش آنياً لتحقيق سد محكم للأنابيب ذات الأقطار الصغيرة يمكن أن تجد سوقاً مرحباً بها بسبب سعرها المقبول. لقد كانت هذه السوق مقتصرة في السابق على التطبيقات الشديدة الأهمية (المقاتلات النفاثة ومرشحات تخثير الدم). ويُضيف زهاو أن فولاذ تذكُّر الشكل غير القابل للصدأ المنخفض التكلفة مرشَّح قوي لاستخدامه في تطبيقات صناعية في هذا المجال، لأن انفعالاً عكوساً مقداره 2 في المئة يكفي لتطبيقات وصل الأنابيب.

واستفادت شركة صينية من هذا الاكتشاف فعلاً. تدَّعي شركة الختشيات Shanghai Tianhe أنها طورت قارنة من الفولاذ غير القابل للصدأ تنكمش لتربط أنبوبين معاً عند تسخينها حتى درجة 250 مْ. ويمكن لفولاذ تذكُّر الشكل أن يكون مفيداً في البيئة البحرية حيث يمثل الصدأ مصدراً رئيساً للقلق.

**مسامير التحرير طراز** Frangibolt® : طوَّرت شركة TiNi Alloy Company مسامير ختشية لاستخدامها بدلاً من تجهيزات المسامير الانفجارية في آليات تحرير الملحقات المثبّتة على المركبات الفضائية. تُستخدم هذه المسامير لتثبيت ملحقات المركبة الفضائية في أثناء

الإطلاق ثم تحريرها بعدئذ بواسطة عنصر يُفعَّل حرارياً[123]. تُكبس أسطوانة ختشية ضمن شق مسمار التحرير، وعندما تُفعَّل بواسطة مسخِّن كهربائي، يزداد طولها الذي يولد قوة أكبر من 22 كيلو نيوتن، فينكسر المسمار في مكان شقه ويُحرِّر الآلية[124]. لقد تفوَّقت مسامير التحرير هذه، التي استُخدمت في مركبة الفضاء كلمنتاين (Clementine) في عام 1994 بنجاح، على الآليات الانفجارية التي كانت مستعملة من حيث إلغائها إطلاق الغازات، والتفعيل التصادفي في أثناء الشحن، واحتمال تأذي المركبة في أثناء الانفجار.

**مفعِّل الجوَّال المريخي سوجورنر (Mars Sojourner Rover)**: استُخدم سلك ختشي لتفعيل لوحة زجاجية فوق خلية شمسية صغيرة في وحدة الجوَّال في أثناء مهمة سوجورنر إلى المريخ. في تجربة لالتصاق المواد في أثناء المهمة، استُخدم مفعِّل ليحل محل المحرّكات والوشائع الثقيلة والكبيرة. عندما شُغِّلت التغذية الكهربائية في الجوال، سُخِّن سلك قصير بسيط من النيكل ـ تيتانيوم فتقلَّص شادًّا لوحة زجاجية من الخلية الشمسية للسماح بمقارنة شدة ضوء الشمس في حالة وجود اللوحة بشدته في حالة عدم وجودها. وبذلك تحدَّد معدَّل تجمُّع الغبار. وسوف تُستخدم البيانات الناتجة من ذلك لتصميم طرائق تنظيف الغبار في مهام المريخ القادمة[125].

**الهوائيات الذاتية الانتصاب (Self-Erectable Antenna)**: صنعت شركة Goodyear Aerospace Corporation نموذجاً أولياً لهوائي فضائي صُمِّم لينطوي متراصّاً عند درجة حرارة الغرفة، وينتشر متوسِّعاً على شكل هوائي كبير حين تسخينه بالطاقة الشمسية[116، 126]. صحيحٌ أن هذا التطبيق لم يتحوَّل إلى تطبيق تجاري ناجح، إلا أن المفهوم قابل للتطبيق، وقد استُخدم النموذج الأولي للقياس عليه في تصاميم مشابهة تُجرى في الصناعة الفضائية.

**أجنحة ذكية للطائرات (Smart Airplane Wings)**: يمكن

استخدام إنشاءات من مواد مركَّبة تحتوي في داخلها على أسلاك ختشية لتغيير شكل جناح الطائرة. ويمكن تفعيل الأسلاك لتقييد وتحسين خصائص الاهتزاز في الجناح، أو تسخينها لتغيير معامل مرونته الفاعل لتقليل الاهتزازات، أو تفعيلها لتغيير شكل الجناح لاستمثال الخواص الحركية الهوائية. يمكن استخدام جميع هذه الخواص لصنع جناح طائرة متكيِّف، يتغير مع تغيّر الظروف المحيطة لتحسين الكفاءة وتخفيض الضجيج.

يجادل أوهاندلي (O'Handley)، من معهد ماساشوستس للتقانة MIT، وأُلاكو (Ullakko)، من جامعة هلسنكي للتقانة في فنلندا[127]، بأن خليطة من النيكل والمنغنيز والغاليوم يمكن أن تستجيب لحقل مغنطيسي بتغيير شكلها. فحينما عرَّض الباحثان عينة من الخليطة الجديدة إلى حقل مغنطيسي أقوى بنحو 2 ـ 3 مرات من ذاك الذي يولِّده مغنطيس باب البراد، أصبحت المادة مطاطية وتمدَّدت. وحينما أزالا الحقل المغنطيسي، دفع نابض الخليطة معيداً إياها إلى شكلها الأصلي. وبتغيير الحقل المغنطيسي دورياً بمعدل عالٍ، استطاعا تكرار الدورة عدة آلاف المرات في الدقيقة. «إنها كالقلب الذي يخفق بسرعة كبيرة»، قال أوهاندلي.

ويعتقد الباحثان أن إضافة التحكّم المغنطيسي سوف تجعل الختشيات عملية الاستخدام أكثر من ذي قبل. «ثمة إمكانات كثيرة في هذه المواد المتحكّم بها مغنطيسياً»، يقول توماس شيلد Thomas Shield، من جامعة Minnesota، الذي يَدرُس الختشيات أيضاً. ويرى أوهاندلي، مثلاً، استخدام الخليطة لصنع أجزاء ميكانيكية خفيفة الوزن في قلابات أجنحة الطائرات. فبلف كمية من هذه المادة الجديدة ضمن وشيعة مغنطيسية، يمكن رفع القلابة وإنزالها فور صدور الأمر، وبذلك تحل محل نظم اليوم الهيدروليكية الثقيلة التي تتطلب مضخة مركزية وأنابيب زيت عدة ممدودة حتى القلابات[128].

## إزالة الجليد عن الحواف الأمامية لأجنحة الطائرات

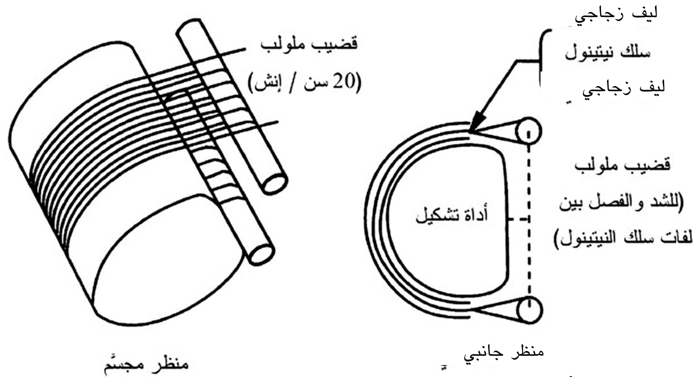
يمكن أن تحصل ظروف جليدية في أثناء تحليق الطائرة عبر الغيوم، مكوِّنة قطيرات ماء فائقة التبريد[129]. ويمكن لقطيرات الماء أن تتجمد فوراً حين تعرُّضها لصدمة، أو أن تنزلق إلى الخلف على طول سطح الجناح على شكل غشاء سائل يتجمد بعدئذٍ. ويمكن للجليد المتراكم أن يخفض الأداء الهوائي الحركي للطائرة إلى حد بعيد، فالمقادير الصغيرة من الجليد يمكن أن تقلِّل الرفع وتزيد الكبح وتغير كثيراً عزم الغوص (Pitching Moment)، وهذا ما قد يسبب فقدان السيطرة على الطائرة.

تمنع نظم إزالة الجليد الحالية الجليد من التراكم بالتسخين، أو تكسِّر طبقة الجليد بعد تكوُّنها باستخدام تشويه السطح. وغالباً ما يُستخدم فائض الهواء الساخن من محرّكات الطائرات العنفية النفاثة لمنع التجمد، في حين أنه تُستخدم سخانات مقاومة كهربائية عادة في الطائرات المروحية والحوامات. إلا أن متطلبات هذه النظم كثيرة: فالمحرّكات النفاثة العنفية ذات نسبة تحويل الهواء العالية محدودة من حيث مقدار الهواء الفائض المتاح، في حين أن التسخين الكهربائي للمقاومات يتطلب طاقة كهربائية عالية. أما أكمام الهواء المضغوط، فتتكون من مادة مرنة تُلصق على الحافة الأمامية للجناح على شكل شرائط، مع ترك معابر مفتوحة بينها. ويُدفع هواء مضغوط خلال هذه المعابر، فيجعل الأكمام تنتفخ إلى الخارج لتقتلع الجليد. صحيحٌ أن متطلبات نظام الأكمام تقل كثيراً عن متطلبات نظام التسخين الكهربائي، إلا أن ذلك النظام لا يكون فاعلاً إلا ضمن مجال ضيق من ظروف التشغيل فقط. وهو يتطلب أيضاً تكاليف صيانة عالية بسبب تدهور حالة مادة الأكمام واهترائها مع الزمن.

لقد دفعت عيوب نظم منع تكوُّن الجليد الحالية الباحثين إلى

استقصاء تقنيات جديدة من قبيل إزالة الجليد بنظم النبضة الكهربائية، أو الطرد الكهربائي، أو التنافر بالتيارات التحريضية. لكن نظراً إلى أن أحد الأهداف الرئيسة من نظم منع تكوُّن الجليد هو جعل استهلاك الطاقة أصغرياً، فإن طريقة تشويه السطح تُستخدم عادةً. ونظراً إلى أن الختشيات تستطيع توليد مقادير جيدة من الانفعال، فإن استخدامها يمكن أن يكون ملائماً، على وجه الخصوص حينما تكون ثمة حاجة إلى تشوّهات كبيرة.

يبيّن الشكل 4 ـ 8 أداة لتصنيع تجهيزة لإزالة الجليد مكوّنة من ختشية مستمرة الأسلاك. يوضع السلك بشكل مستمر على الأداة بلفه حول قضيبين مُلوْلبَيْن، ويؤمِّن القضيبان شدّ السلك المطلوب في أثناء سيرورة شيّ المادة المركَّبة.




**الشكل 4 ـ 8: أداة جديدة لصنع تجهيزة ختشية من سلك مستمر لمنع تكوُّن الجليد على أجنحة الطائرات.**

بعد التصنيع الناجح لتجهيزة إزالة الجليد المكوَّنة من ختشية سلك مستمر، أُخضعت إلى اختبارات تجمُّد سكونية أولية منخفضة استهلاك الطاقة، وكانت الاختبارات ناجحة. إلا أن سلك النيتينول

الملفوف حول القضيب الملولب كان أطول مما كان مخططاً في البداية، وهذا ما يستدعي إدخال تعديلات إضافية في السلك بغية تحقيق مزيد من تخفيض استهلاك الطاقة اللازمة لإزالة الجليد[129].

## مواد ذكية للحوامات

يمكن أن تكون ثمة تطبيقات للختشيات في الحوامات، لأن تلك المواد تتصف بالمقدرة على تغيير بنيتها البلّورية مع تغيّر درجة الحرارة[130]. إنها الخاصية نفسها التي تمكِّن الحداد من صنع إزميل متين بارد من قضيب فولاذي طري.

يحصل هذا التغيّر من بنية بلورية مرتنزيتية عند درجة حرارة الغرفة إلى أوستنيتية عند درجات حرارة أعلى. وفي حالة الإزميل البارد، يمكن لتغيّرات درجة الحرارة أن تكون أكبر من 649 مْ، إلا أن الختشية يمكن أن تُجعل بحيث تغيّر خصائصها على مجال حراري أضيق كثيراً.

رغب المهندسون في جامعة ماريلاند في جعل قضيب يدور بسرعة عالية تتجاوز سرعته الطنينية (التجاوبية) من دون استخدام مخمدات. لقد صُمِّمت قضبان الدوّار الذيلية (Tail-Rotor Shaft) في بعض المروحيات كي تعمل عند سرعات تزيد على «تردّد توافقية القضيب الطنينية الأولى» (First Critical Frequency)، باعتبار ذلك إجراء لتخفيف الوزن، إلا أنها تحتاج إلى مخمدات لعبور ذلك التردّد بأمان في أثناء تسريع الدوّار إلى سرعة عمله (تجب الإشارة إلى أن هذه المخمدات بسيطة ووزنها ليس كبيراً).

واقترح أولئك المهندسون إلغاء المخمدات والاستعاضة عنها بزيادة جساءة القضيب، تماماً قبل الوصول إلى تردّد التوافقية الأولى، ثم إعادتها إلى طبيعتها بعد اجتياز ذلك التردّد بأمان. يُبيِّن التحليل أنه

باستخدام قضيب ذيلي دوّار من مادة مركَّبة متناسب مع أبعاد الحوامة أباتشي الأميركية، على سبيل المثال، ويحتوي على أسلاك ختشية مناسبة، يمكن لتردّد الطنين أن يزداد بنحو 15 في المئة.

من التطبيقات الممكنة الأخرى تغيير جساءة مكوّنات من قبيل الموازِنات (Stabilizers) في أثناء اختبارات الطيران لتحديد الخصائص الصحيحة التي تدرأ الطنين المحرَّض بحركة الشفرات.

**مخمِّد اهتزازات نظام فضائي (Space System Vibration Damper)**: يمكن لمخمدات الاهتزازات، المصنوعة من مواد مركَّبة تحتوي على أسلاك أو شرائط ختشية قَبْلية الانفعال، أن تقلِّل الحركة غير المرغوب فيها في نظم الفضاء المختلفة. هنا، يكتشف مُحِسٌّ الاهتزاز، فيرسل إشارة لتفعيل المادة المركَّبة التي تغيّر خواصها الإنشائية الحركية لتخميد أو إلغاء الاهتزازات الموجودة[114].

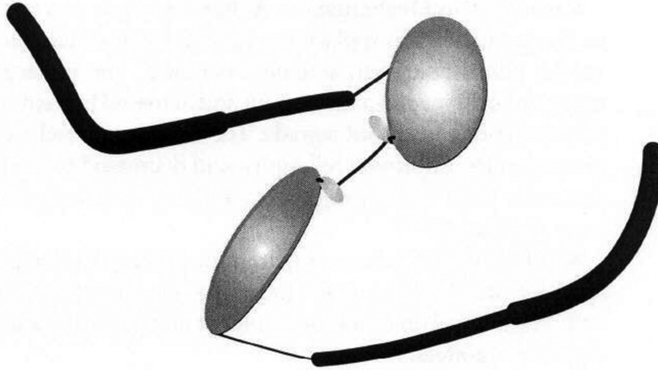
## المنتجات الاستهلاكية

استُخدمت التجهيزات والمكوِّنات الختشية في المنتجات الاستهلاكية التي تُنتَج بكميات كبيرة طوال مدة تزيد على 25 سنة. ومع أن كثيراً من المستهلكين الذين يستخدمون هذه المنتجات لا يعرفون شيئاً عن مكوِّناتها، فإن ثمة إدراكاً شعبياً متزايداً لأهميتها، نجم عن إعلانات حديثة تروِّج مزايا منتجات ختشية جرى تسويقها.

**إطارات نظارات مرنة من الطراز** Flexon® (**Optical Frames**): تُعدُّ إطارات النظارات الفائقة المرونة واحدة من أكثر الختشيات استخداماً وشهرة. فهي غالباً ما تكون مادة إعلانية في الدعايات التلفزية، إضافة إلى إمكان وجودها لدى معظم بائعي إطارات النظارات. تُصنَع مكوِّنات إطار النظارة التي تتعرَّض للحَنِي كثيراً، أي الجسر الأنفي والأجزاء الصدغية، من أسلاك النيكل ـ تيتانيوم،

وتُصنع بقية الأجزاء من مواد عادية لأغراض الضبط وتخفيض التكلفة. إن مقدرة النيكل ـ تيتانيوم العالية على عكس الانفعال تجعل تلك الإطارات شديدة المقاومة للتشوّه واللَّي (انظر الشكل 4 ـ 9).

**هوائيات الهواتف النقالة (Portable Phone Antennae)**: أدى الطلب المتزايد للهواتف النقالة إلى استخدام مادة النيكل ـ تيتانيوم الفائقة المرونة بكميات كبيرة. فمعظم هوائيات الهواتف الخلوية المُنتَجة اليوم تتألف من أسلاك نيكل ـ تيتانيوم مخمدة بالبولي أوريثان. تقاوم المرونة الفائقة الالتواء الدائم وتتحمَّل إساءة الاستخدام طوال مدة حياة الهاتف النقال.



**الشكل 4 ـ 9: إطار نظارة مقاوم للتشوه (نُشرت الصورة بناء على موافقة الشركة** Marchon EyewearÛ

**فاتح نافذة البيت الزجاجي (Greenhouse Window Opener)**: تُستخدم ختشية ذات حلقة تباطؤ ضيقة مفعِّلاً لفتح وإغلاق نوافذ البيوت الزجاجية عند درجات حرارة محدّدة سلفاً بغية التحكّم الآلي بدرجة الحرارة. أداة الفتح هو مفصلة ذات نابض ختشي من خليطة النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم، إضافة إلى نابض معدني عادي معاكس

للنابض الختشي. ينضغط النابض الختشي بالنابض المعاكس عند درجات الحرارة التي تقل عن 18 مْ، فتنغلق النافذة. ويتفعَّل النابض الختشي عند درجة حرارة تساوي 25 مْ تقريباً، فيتغلب على قوة النابض المعاكس ويفتح النافذة. يعتمد هذا التصميم على حلقة التباطؤ الحرارية الضيقة، وعلى استخدام قوة معاكسة. صحيحٌ أنه عندما يبرد النابض الختشي حتى 18 مْ لا يكون قد برد بقدر يكفي لانتقاله كلياً إلى طوره المرتنزيتي الليِّن، إلا أن تحوله يكفي لاحتواء التشوّه عبر المرتنزيت المحرَّض بالإجهاد.

**آلية رأس التسجيل (Recorder Pen Mechanism)**: صُمِّم محرّك رأس ختشي في أول سبعينيات القرن العشرين ليحل محل آليات تحريك الرأس التي كانت سائدة آنئذٍ، وكانت تعتمد على التحريك المغنطيسي الكهربائي لذراع الرأس. واستُخدمت في الرأس الختشي أسلاك نيكل ـ تيتانيوم قَبْلية الانفعال، ويجري تفعيلها بتسخينها بواسطة وشيعة تحريضية استجابة لإشارة الدخل. لقد قلَّص التصميم الجديد عدد الأجزاء المتحركة في آلية تحريك الرأس، وحسَّن وثوقيتها، وخفَّض تكلفتها. وظهرت وحدات رؤوس التسجيل الجديدة في عام 1972، وبحلول عام 1980 كان قد صُنع منها ما يزيد على 500 ألف وحدة[131][132].

**عصي غولف لنادي نيكلاوس (Nicklaws Golf Clubs)**: جرى تطوير لُقْمة ختشية فائقة المرونة لعصا كرة الغولف لمصلحة نوادي نيكلاوس للغولف. تُبقي الخواص المخمِّدة في اللقمة كرة الغولف على وجه العصا مدة أطول، موفرة لها تدويماً أشد، وتعطي اللاعبين سيطرة أفضل على الكرة[133].

الصُّدَر الثديية السلكية (**Brassiere Underwires**): تُعدُّ أشكال النيكل ـ تيتانيوم الفائقة المرونة المتكيفة مع الجسم مثالية لتطبيقات الملابس السلكية الداخلية، لأنها لا تتأثر بحرارة وقوى الغسيل

المتكرر. في هذا التطبيق، تعطى الأسلاك شكلاً محدّداً سلفاً باستخدام أسلاك دائرية المقطع أو شرائط مسطحة. لقد نجح هذا المنتج تجارياً في آسيا، إلا أن تكلفته المرتفعة مقارنة بتكلفة الملابس الداخلية العادية قلّصت مقدار المباع منها في أسواق أميركا الشمالية وأوروبا.

**صمّام المشعّ الحراري المنزلي المنظَّم حرارياً (Residential Thermostatic Radiator Valve)**: استُخدمت المفعِّلات الختشية لتنظيم حرارة المشعات المنزلية. يتمدّد المفعِّل حين ارتفاع درجة حرارة الغرفة، ويتغلب على قوة نابض معاكس، فيغلق صمّام الماء الساخن في المشع. وبمساعدة قوة النابض المعاكس، يمكن تضييق حلقة التباطؤ الحرارية حتى 1.2 مْ[131]. ويمكن ضبط صمّام تنظيم الحرارة بواسطة مقبض يغير ضغط النابض المعاكس. فكلما ازداد الضغط الذي يُظهره، ازدادت درجة الحرارة اللازمة لتفعيل الوشيعة الختشية وإغلاق صمّام الماء الساخن[132].

**صمّام طنجرة طبخ الرز (Rice Cooker Valve)**: استُخدمت آلية صمّام ختشي بنجاح لتحسين أداء طناجر طبخ الرز. تتكوَّن الآلية من نابض ختشي ونابض معاكس، وهي توضع ضمن غطاء الطنجرة. يكون الصمّام مفتوحاً في أثناء طبخ الرز وخروج البخار، وعندما ينضج الرز، يبرد النابض الختشي، فيُغلق النابض المعاكس الصمّام لإبقاء الرز ساخناً. تُستخدم في النابض الختشي خليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس بسبب انفعالها الضعيف ومقاومتها المديدة للتعب الدوري. صحيحٌ أن قوة استعادة الشكل فيها تتناقص مع الاستخدام المتكرر، إلا أن هذا التطبيق حقَّق تكراراً بلغ 30 000 دورة، وهذا يكافئ عدة طبخات في اليوم مدة عشر سنوات[134].

**الدُمى الروبوتية (Robotic Doll)**: صُمِّمت أسلاك تفعيل ختشية لتحريك ذراعي وساقي دمية ذات خصائص تحاكي الخصائص الإنسانية. إن هذا التطبيق ممكن تقنياً، وقد كانت نماذجه الأولية

ناجحة. إلا أن متطلباته من الطاقة لتفعيل الأسلاك كانت كبيرة جداً. إن معدل تغيير بطاريات الدمية كان كبيراً إلى درجة حدَّت من قبول المنتَج في السوق.

**متفرقات (Miscellaneous Products)**: جرى في اليابان تطوير مجموعة دفَّات لحرف تدفق الهواء المكيَّف إلى الأعلى أو الأسفل اعتماداً على درجة الحرارة باستخدام مفعِّلات ختشية. وجرى أيضاً تطوير غلاَّيات قهوة مع صمّامات تحكّم بالحرارة تبدأ بمزج القهوة عند غليان الماء(135). ومن المنتجات الختشية الأخرى شراك صيد سمك فائقة المرونة، وسمّاعات رأس متطورة ومرنة جداً طراز Sony Eggo™ لاستخدامها مع مشغِّل الموسيقى ذي القرص الصغير Walkman®، وأشياء جديدة أخرى من قبيل ملعقة الشاي السحرية ذات الذاكرة. تُعطى الملعقة إلى شخص لتحريك المشروب الساخن، وعندما يضعها في السائل، تنحني فوراً.

**محرّكات مُصغَّرة للدمى (Toy Miniature Motors)**: يمكن لمصنِّع مفعِّلات انسحابية ضئيلة أن يجعل تلك المفعِّلات تحل محل ملايين المحرّكات الصغيرة في الدمى والكاميرات وسواقات الأقراص ونظم التحكّم بالسيارات. صحيحٌ أن هذه المفعِّلات تحتوي على محرّكات ورجاجات كهربائية من حجم كلاَّبة الورق، إلا أن الجزء الفاعل فيها هو سلك رفيع جداً ذو بنية داخلية نانوية المقاس من خليطة النيكل ـ تيتانيوم. تتكون هذه البنية من بلّورات نانوية المقاس تتحد معاً لتكوين جدائل تساوي أقطار مقاطعها 50 ميكروناً، ويقوم التيار الكهربائي بإعادة ترتيبها بالتسخين.

يُسخَّن السلك الختشي إلى ما فوق درجة حرارة حرجة، فيتقلَّص بمقدار يصل حتى 40 في المئة جارًا بحركة انسحابية ما لا تستطيع محرّكات بحركتها الدوارة فعله إلا بمساعدة مرافق متمفصلة كبيرة وثقيلة. أما كثافة الطاقة (Energy Density) في تلك الأسلاك

فتساوي نحو 1000 ضعف من تلك التي للعضلات، أو 4000 ضعفا من تلك التي لمحرّك كهربائي. عملياً، هذا لا يمثل إلا زيادة مقدارها 400 ضعف في نسبة الطاقة إلى الوزن، لأن الأسلاك الضئيلة مرتبطة بمبددات حرارية أثقل منها كثيراً لتبريدها، تمهيداً لتقلّصها التالي. لكن من الواضح أن قفزة بمقدار 400 ضعف هي قفزة كبيرة المغزى.

تكمن الفرصة الحقيقة لهذه الأسلاك في السيارات. لكن نظراً إلى أن دورة تجديد السيارات هي من رتبة كثير من السنوات، في حين أن دورات تجديد الدمى لا تستغرق سوى شهور، فإن المشهد المثير القريب لهذه التقانة هو في دمى من قبيل الروبوت لوك (Luke). يستطيع لوك تحريك رأسه وعينيه وفكّيه معاً في آن واحد، أو تحريكها فرادى بأي ترتيب، من دون إحداث أي صوت. بالمقارنة، يكرِّر نظيره فربي (Furby) ذو المحرّكات، الحركات نفسها المُبَرمجة عتادياً مع جلبة وضجيج، مستهلكاً من الكهرباء خمسة أمثال ما يستهلكه لوك. طبعاً، ليس ثمة دمى كثيرة بحاجة إلى كثير من القوة المحرّكة. إلا أن لوك هو إثبات للفكرة التي تنتظرها سوق أكثر اتساعاً وربحاً: فالسيارة المتوسطة الرفاهية تحتوي على 170 محرّكاً.

## منتجات الأمن التجاري والصناعي

**الصمّام الواقي من الماء الحار طراز (MemrySafe®) (Antiscald Valve)**: صمّام ختشي صُمِّم كي يوقف تدفق الماء الساخن إلى الصنبور إذا أصبحت درجة حرارة الماء أعلى من المقبول (فوق 49 مْ). ويعود الصمّام ليسمح بتدفق الماء عندما يبرد حتى درجة حرارة مأمونة، واقياً المستخدم من الاحتراق بالماء الساخن.

**صمّام إنذار الحريق طراز (Firecheck®)**: هو تجهيزة أمان تحتوي على مفعِّل ختشي، وتُستخدم غالباً في خطوط العمليات الصناعية لإيقاف تدفق الغاز في حالة حدوث حريق. تفعِّل الحرارة

العالية الصمّام الذي يوقف الهواء المضغوط الذي يتحكم بأسطوانات الغاز وصمّامات الأنابيب(136).

**القواطع الكهربائية (Circuit Breakers)**: استُخدمت الختشيات في قواطع الدارات الكهربائية بدلاً من ثنائيات المعدن المعهودة. فنظراً إلى القوى الشديدة التي تتطلبها القواطع الكبيرة، يجب استخدام سلسلة من الأذرع لتضخيم القوى التي تولِّدها ثنائيات المعادن. لقد استُخدمت خلائط النحاس ـ ألمنيوم ـ نيكل في هذا التطبيق، بدلاً من ثنائيات المعادن، بسبب تفعُّلها عند درجات حرارة عالية وضيق حلقة تباطئها الحراري. وتزيد ذراع بسيطة من القوة والحركة الانسحابية نافيةً الحاجة إلى أذرع تضخيم القوة.

**وصلة الأمان طراز** Proteus® **(Safety Link Device)**: صُنعت سلسلة من خليطة النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم تغيِّر شكلها عند درجات الحرارة العالية، وتعمل كآلية لتشغيل نظام رش مائي، أو إعطاء أمر بإغلاق أبواب منع النار من الانتشار، تبعاً للتطبيق(137).

**فواصم حرارية لخطوط الاتصالات (Telecommunication Line Fuses)**: تُستخدم في أوروبا تفريعات من النحاس ـ زنك ـ ألمنيوم، على التوازي مع فواصم حرارية شديدة الحساسية، وذلك لحماية نظم الاتصالات من الصواعق. في أثناء العمل الطبيعي، لا تسخن التفريعة، فيمر التيار الكهربائي كله عبر الفاصمة، وتبقى التفريعة غير فاعلة. أما في حالة الاستخدام الكثيف، فيزداد مفعول التفريع مع زيادة الحرارة، فتتفعل المفرّعة، وتقصر الفاصمة لحمايتها من الاحتراق(137).

**آلية أمان حاويات النفايات (Safety Trash Lid Mechnism)**: صُمِّمت تجهيزة ختشية لإخماد النار العرَضية في حاويات النفايات العمومية. تُبقي التجهيزة غطاء الحاوية مفتوحاً عند درجات الحرارة العادية، لكن عندما تسخن بسبب اندلاع نار في الحاوية، تُحرِّر تجهيزة ختشية مزلاجاً فيسقط غطاء الحاوية مُغلِقا إياها بغية إخماد النار.

## التطبيقات الطبية

تقبَّلت الصناعة الطبية استخدام الختشيات سريعاً في كثير من التطبيقات. ففي الصناعات الطبية المختلفة، من صناعة الإبر المدبَّبة البسيطة، حتى صناعة المكوِّنات المعقّدة التي تُزرع في تيار الدم، اعتُمدت خلائط النيكل ـ تيتانيوم بسبب إمكاناتها في توفير حلول مثالية فريدة للمشاكل الطبية الموجودة. تشتهر تلك الخلائط بتوافقها الحيوي الممتاز ومقاومتها للتآكل، ولذا استُخدمت بنجاح في كثير من التجهيزات الطبية، وهي الآن واسعة الانتشار في الصناعة الطبية.

يقوم معظم تطبيقات الختشيات الطبية على خاصية المرونة الفائقة للنيكل ـ تيتانيوم، وكثير منها يُستخدم في حقل الجراحة التنظيرية المتوسِّع. ونظراً إلى انعكاسية الانفعال القوية لخلائط النيكل ـ تيتانيوم، فإن القطع المصنوعة منها تستطيع تحمّل تغيُّرات شكل كبيرة تجعلها أصغرية الهيئة في أثناء زرعها، ثم تتمدَّد لتصبح تجهيزات أكبر ضمن الجسم. لقد ألغى كثير من هذه التجهيزات الختشية الحاجة إلى جراحة القلب المفتوح، وقلَّصت بذلك الخطر ومدة الاستشفاء في المستشفى.

**أسلاك قوس تقويم الأسنان (Orthodontic Dental Arch Wires)**:
اسُتخدمت أسلاك الأسنان، وهي إحدى تطبيقات الختشيات الطبية الأولى، أول مرة في عام 1977 لتحل محل أسلاك الفولاذ غير القابل للصدأ لتقويم الأسنان. في البداية، استُخدمت الأسلاك في طورها المرتنزيتي، وكانت تُشغَّل على البارد، وتُلف على الأسنان. وكانت تتصف بخواص شدّ نابضية إلى الخلف كافية لذلك التطبيق. وفي ما بعد، استُخدمت أسلاك نيكل ـ تيتانيوم فائقة المرونة (أوستنيتية الطَور) بغية تحسين الأداء. والآن، يُصمَّم السلك القوسي الفائق المرونة بحيث تُستغل منطقة استقرار منحني العلاقة بين الإجهاد

والانفعال التي تحقّق إجهاداً ثابتاً على الأسنان مع استرجاع السلك إلى شكله وتقويمه الأسنان.

**إبرة تحديد مواقع الأورام الثديية (Mitek Homer Mammalok®)**: جرى في عام 1985 تصميم محدِّد موضع على شكل سلك إبري فائق المرونة لتحديد مواضع أورام الثدي الخبيثة بغية تحديد الاستئصال الجراحي. تُستخدم الإبرة مسبراً لتحديد موقع الورم في الثدي بدقة بعد أن يكون قد جرى تشخيصه بتصوير الثدي بالأشعّة. يجد الجراحون عادةً، صعوبة في تمييز الورم من النُسُج المحيطة به، لذا يُستخدم المسبر لإضاءة موضع الورم الصحيح تمهيداً للإجراءات الجراحية[138].

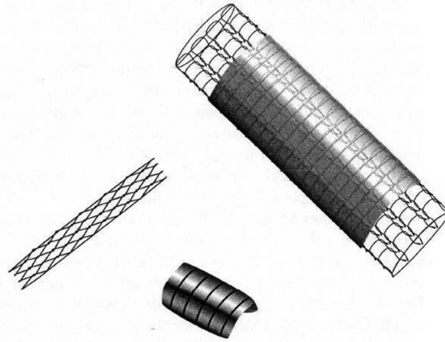
**خطاطيف الخيوط الجراحية من الشركة (Mitek Structure Anchers)**: تُعدُّ خطاطيف الشركة Mitek، المكوَّنة من جسم من التيتانيوم أو النيكل ـ تيتانيوم، التي تتألف من قوسين أو أكثر من أسلاك النيكل ـ تيتانيوم الفائقة المرونة، ماسكات خيوط جراحية آمنة ومستقرة، وتُستخدم لإعادة لصق الأوتار والأربطة والنُسُج الرخوة بالعظم، حيث يوضع الخطّاف في ثقب محفور في عظم المريض ويثبت بقوس النيكل ـ تيتانيوم. ابتُكرت هذه الخطاطيف في عام 1989، وهي تُستخدم في جراحة الكتف لتثبيت الخيوط الجراحية مع العظم، وفي كثير من تطبيقات التجبير الأخرى، من قبيل خطاطيف الأربطة المستخدمة في إعادة لصق رباط الركبة التصالبي الأمامي[139].

**نوى أسلاك التوجيه (Gridewire Cores)**: تُدخل أسلاك النيكل ـ تيتانيوم عبر المجاري الملتوية في جسم الإنسان بغية توجيه وإدخال أدوات وتجهيزات أخرى خاصة بمداخلات جراحية. يمكن استخدام هذه الأسلاك الفائقة المرونة في عمليات الجراحة التنظيرية، التي تُجرى الجراحة فيها من خلال منفذ صغير في شريان رئيس، حيث توفّر هذه الأسلاك مرونة فائقة مع مقاومة للفتل تمكّن من توجيه أمثلي واستخدام سهل لأداة الجراحة[140].

تستفيد أسلاك التوجيه، التي تُستخدم لتوجيه القسطرة وإدخال الشبكة الأنبوبية Stent، أيضاً من خواص النيتينول الفائق المرونة. يشابه إدخال القسطرة في الوريد حشر شريط معكرونة مبلل فيه، لذا يُستخدم سلك التوجيه، المقاوم للحني والفتل بعودته النابضية إلى شكله، لدعم القسطرة.

**الشبكات الأنبوية (Stents)**: غدت الشبكات الأنبوبية الختشية واسعة الانتشار في الصناعة الطبية. تُزرع هذه المكوّنات الأسطوانية في جسم الإنسان لفتح وتدعيم جدران الأوعية الدموية والمجاري الأخرى ودرء انهيارها أو انسدادها، ولترميم المتأذي منها. وتُستخدم مواد النيكل ـ تيتانيوم أيضاً بدلاً من المعادن الأخرى لفتح الشريان التاجي وتدعيمه، وهي تُستخدم، في أغلب الأحيان، في مواقع محيطية كالشريان السباتي، أو المريء، أو القناة الصفراوية.

يبيّن الشكل 4 ـ 10 أشكالاً عدة من الشبكات الأنبوبية المصنوعة من النيكل ـ تيتانيوم.



**الشكل 4 ـ 10: شبكات نيتينول. من اليسار إلى اليمين: شبكة فائقة المرونة (قطر خارجي: 5 مم، طول: 40 مم)، جرى قصها ليزرياً من أنبوب نيكل - تيتانيوم؛ مجموعة شريط نيكل - تيتانيوم على شكل وشيعة؛ شبكة مري من الشركة** Ultraflex® **مخاطة مع غطاء قماشي (نُشرت الصورة بناء على موافقة الشركة** Shape Memory Applications, Inc.).

تعتمد الشبكات الأنبوبية الموجودة في السوق حالياً، وتلك التي في قيد التطوير، على خواص الختشيات الوظيفية المختلفة: مرونة الأوستنيت الفائقة، وتذكُّر الشكل حرارياً، ومُعَامل يونغ الفاعل المنخفض للمرتنزيت. ويستخدم كثير من الشبكات الختشية هذه مجموعة من خواص المرونة الفائقة وتذكُّر الشكل. على سبيل المثال، يمكن تبريد الشبكة بجليد مائي لتحويلها إلى مرتنزيت، وتُضغط في الحالة المرتنزيتية، وتوضع ضمن غمد واقٍ لتبقى بشكلها الأصغري، ثم تُدخل إلى الجسم عبر منفذ صغير. وعندما تصل إلى مكانها، يُسحب الغمد، وتسخّن الشبكة حتى درجة حرارة الجسم، مستعيدة شكلها الأصلي. وبعد استرجاعها شكلها، أو تحوُّلها إلى أوستنيت، تولِّد خاصية المرونة الفائقة للشبكة قوى ثابتة تضغط بلطف على جدران الوعاء. أما الشبكات التي تكون في الحالة المرتنزيتية عند درجة حرارة الغرفة أو الجسم، فتُضغط على بالون إقحام، ثم تتمدّد بعد وصولها إلى مكانها في الجسم. إن شبكة الشريان الإكليلي (Paragon Coronary Stent) التي طورتها شركة Vascular Therapies هي مثال للشبكة المرتنزيتية التي تُسوَّق بسبب تمدّدها المتناظر المتجانس ومرونتها في أثناء إقحامها في الشريان.

وثمة أنواع جديدة ومختلفة من الشبكات التي توضع بالقرب من سطح الجلد. لذا يمكن أن تتعرض هذه الشبكات للتلف بسهولة بسبب عصرها أو ضغطها. لكن باستخدام النيتينول، طَوّر الباحثون شبكات تعود إلى شكلها حين عصرها أو ضغطها.

ومن أعضاء الجسم المعتلة التي يمكن أن تستفيد من شبكات النيتينول الشريان الأبهر والمريء والمسالك البولية والكبد. وقد طَوَّر أحد أكبر منتجي التجهيزات الطبية الختشية في العالم أخيراً شبكة من النيتينول لمعالجة العوائق المهدّدة للحياة في المجاري الصفراوية.

تتوسع سوق الأنابيب الشبكية (Stents)، وغيرها من التجهيزات المصنوعة من النيكل ـ تيتانيوم والتي تدعم الأوعية الدموية، مع سعي الأطباء ومرضاهم إلى تقنيات أقل جراحة، ومع سعي المهندسين إلى تحسين نظم إقحام الشبكات الأنبوبية في الجسم.

تُستخدم الأنابيب الشبكية، وهي أنابيب ضئيلة من شبكة سلكية، لفتح ودعم الشرايين المسدودة أو التالفة. وفي معظم الأحيان، تُدخل قسطرة بالون في الأنبوب وتُقحم بعدئذٍ إلى موضع الانسداد. وعند نفخ البالون، يتوسع الأنبوب مكوّناً دعامة لإبقاء الشريان مفتوحاً، والسماح لمزيد من الدم بالجريان. وتبقى الشبكة في الشريان بعد تخلية البالون وسحب القسطرة.

ثمة إجراء جديد لعلاج الأورام الوعائية في جوف الشريان الأبهر، وهو شريان الجسم الرئيس، يُسهِّل استبدال الشبكة باستخدام تجهيزة ذاتية التوسع. إن الأورام الوعائية، على غرار البقع المهترئة في دولاب مطاطي، يمكن أن تتمزق أحياناً. وإجرائية الترقيع بالأنبوب الشبكي الجديدة تمثل بديلاً أخفّ وطأة من الجراحة الشريانية المعتادة في إصلاح الشريان الأبهر.

في هذه الحالة، تُقحم القسطرة عبر الشريان الفخذي في ساق المريض باتجاه الشريان الأبهر. ثم يوجه الأنبوب عبر القسطرة على رأس سلك إلى منطقة الشريان الأبهر المصابة، حيث يتوسَّع هناك بحرارة الجسم.

وأجرى الجراحون أكثر من مئة عملية إصلاح للأورام الوعائية باستخدام هذه الطريقة في عيادة مايو (Mayo Clinic) في روشستر بمينيسوتا، وكان نوعان من الشبكات التي استخدموها قد صُنعا من النيتينول. وحظي نظام الترقيع بالأنابيب الشبكية هذا بموافقة إدارة الأغذية والعقاقير الأميركية FDA في عام 1999.

صحيحٌ أن الشبكات يمكن أن تُصنع من مواد مختلفة، ومنها الفولاذ غير القابل للصدأ، إلا أن النيتينول يحظى بالأفضلية في بعض التطبيقات لأنه يمكن أن يغيّر شكله استجابة للتغيّرات الحرارية أو الميكانيكية، ولأنه عالي المرونة. فالأنبوب المصنوع من النيتينول والمبرَّد في شكل متراص، والذي يُقحم بعدئذٍ في وعاء دموي، سوف يعود بلطف إلى شكله المتوسع حين تعرضه لدفء الجسم، مقلِّلاً الأذى المقترن باستبدال الأنبوب.

من الخواص التي تجعل النيتينول مفيداً في تلك التطبيقات الطبية إجهاد التحميل العالي المستقر (450 ميغا باسكال عند انفعال مقداره 3 في المئة)، والتشوّه الدائم المنخفض (0.2 في المئة عند انفعال مقداره 6 في المئة)، ودرجات حرارة التحوُّل الطَوري الممتدة من 5 حتى 18 مْ.

**حشوة سايمون النيتينولية (Simon Nitinol Filler)**: اخترع الدكتور موريس سايمون (Morris Simon)، لدى شركة Nitinol Medical Technologies, Inc. مرشِّحاً ختشياً للخثارة الدموية في الوريد الأجوف، وهو على شكل سلة سلكية أو إطار مظلة مصنوع من سلك نيكل ـ تيتانيوم. قبل إقحام المرشِّح في الجسم، يُبرَّد حتى ما دون درجة حرارة تحوُّله الطَوري، ويُضغط ضمن أنبوب إقحام صغير. ويُبرد المرشِّح في أثناء إقحامه في جسم المريض بتيار من محلول ملحي بارد، ثم يتوسَّع حين تعرّضه لحرارة الجسم بعد وصوله إلى مكانه. لقد صُمِّم الشكل المشابه للمظلة لالتقاط خثارات الدم التي في تيار دم المريض لدرء الانسداد الرئوي[141].

**الرقع القلبية طراز ®Amplatzer (Septal Occluder)**: تُصمّم تجهيزات الترقيع لتعمل مثل لصاقات الإسعافات الأولية لتغطية ومعالجة ثقوب القلب من دون الحاجة إلى جراحة قلب مفتوح، وهي تُصنع عادةً من مواد عادية. والرقعة هي تجهيزة ختشية مكوّنة

من إطار من سلك نيكل ـ تيتانيوم منسوج على شكل غطائين مسطحين موصولين بمقطع أنبوبي قصير. وتُقحم القطعة في الجسم عبر منفذ في الشريان الفخذي، وتوضع عند مركز الثقب الذي سوف يُسد. ويُسحب بعدئذٍ الغمد، فيندفع الغطاءان المسطحان ويلتصقان على جانبي الثقب، فيغلقانه ويوفّران ختماً محكماً له[143].

**تجهيزات التجبير (Orthopedic Devices)**: تُستخدم المواد الختشية، بسبب مرونتها الفائقة وتذكُّرها للشكل، في العديد من تجهيزات التجبير المختلفة المصممة لتسريع تكوُّن العظم والغضاريف تحت إجهادات ضاغطة ثابتة. وتُستخدم ألواح قَبْلية الانفعال لمعالجة كسور العظام. عند تثبيت الألواح على طرفي الكسر وربطها معاً بالبراغي، تولِّد قوة ضاغطة لمعالجة منطقة الكسر. وتُستخدم أيضاً كلاَّبات من الشكل U لتجبير الكسور. توضع كلاَّبة نيكل ـ تيتانيوم، وهي في الحالة المرتنزيتية، بحيث يُحشر مقطع العظم في مكان الكسر بين ساقي الكلاَّبة. وعندما تسخَّن الكلاَّبة ينحني ساقاها نحو الداخل وتضم العظم المكسور بقوتها الضاغطة[144]. وتُستخدم فاصلات مسافة أيضاً من النيكل ـ تيتانيوم للمساعدة على تقوية العمود الفقري في العمليات الجراحية. في هذه العمليات، يُحشر فاصل على شكل حلقة مضغوطة بين الفقرات، ثم يُسخَّن فيتوسع ويفتح فجوة بين تلك الفقرات. وتُوضع شرائح عظم في الفجوة، ومع مرور الوقت يحصل اندماج تدريجي لتكوين عظم صلب. واستُخدمت ختشيات لها أشكال القضبان الصلبة في معالجة التقوس الفقري. تُشكَّل قضبان مرتنزيتية بحيث يتطابق شكلها مع التقوس الفقري الأصلي للمريض، ثم تربط مع العمود الفقري. وحين استعادتها شكلها تدريجياً، تعيد العمود الفقري إلى الوضع المصحَّح[114].

**المضخّات الصغيرة (Minipump)**: بنى المهندسون في جامعة Case Western Reserve نموذجاً أولياً لمضخّة دواء حجمها يساوي

حجم العدسة اللاصقة. تستطيع هذه المضخّة مراقبة معدل التدفق عبرها لضمان إمداد مستقر بالدواء، ومن أمثلة ذلك حقن مرضى السكر بالإنسولين. يُستخدم في هذه المضخّة الضئيلة ذات حلقة التحكّم المغلقة مُحِسٌّ تدفق لقياس وضبط معدل الضخ لتحقيق إمداد دقيق. يتكوَّن نموذج المضخّة الأولي من حجرة سليكونية مستطيلة، أحد جدرانها الخارجية مصنوع من طبقتين رقيقتين من خليطة نيكل ـ تيتانيوم، تحصران بينهما طبقة من السليكون. تُرغم الخليطة على تغيير شكلها بتسخينها حتى نحو 60 مْ. ولتشغيل المضخّة، تُمرَّر نبضة تيار كهربائي متكررة مباشرة عبر الخليطة، مولّدةً دورة من التسخين والتبريد تجعلها تنحني. وهذا يُرغم الحجرة على التوسع والتقلص. ويؤدّي التوسُّع إلى سحب سائل إلى الحجرة عبر صمّام إدخال، ويؤدّي التقلّص إلى إخراج السائل عبر صمّام تصريف في الدم.

**طلاء هيدروكسي الأباتيت على ختشيات النيكل ـ تيتانيوم (Hydroxyapatite Coatings on Ni-Ti SMAs)**: يُعدُّ حقل المواد التي تُزرع في الجسم البشري أسرع حقل نمو في صناعة الرعاية الصحية. وقد جرى توثيق المزايا الطبية والاقتصادية للمواد المعدنية الخاصة بمعالجة الآفات الرضية والتهاب المفاصل توثيقاً جيداً خلال السنوات الماضية[145]. وفي العقد السابق، استُخدمت المواد المعدنية المطلية ذات المساحة السطحية الكبيرة، التي تُسهِّل التئام المادة المزروعة مع النسيج العظمي، وتزيد من سلامة المادة المزروعة، على نطاق واسع، برغم الارتياب في استقرار الطلاء على المدى البعيد. وإذا استُخدمت ختشيات النيكل ـ تيتانيوم، أصبح الطلي بقصد زيادة مقاومة التآكل غير ذي مغزى عملياً، لأن تلك الختشيات مقاومة بطبيعتها للتآكل في البيئة التي سوف توضع فيها.

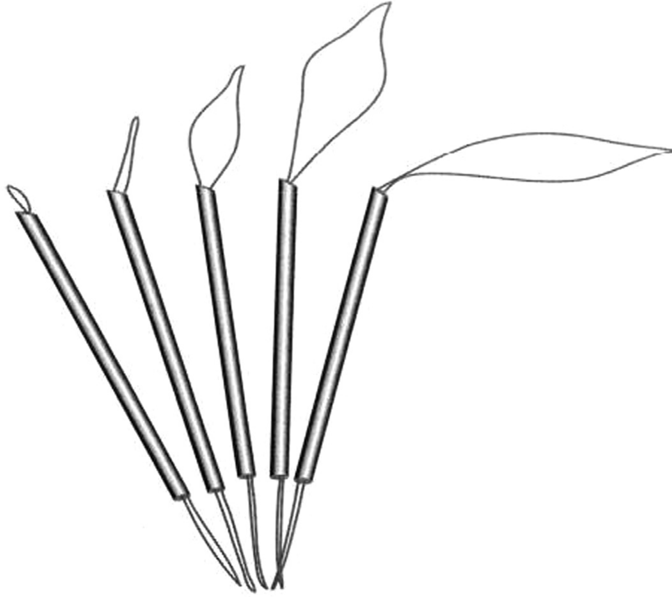
وتوفّر تقنيات البخ البلازمي فرصة لضم مواد مختلفة معاً من

دون أن تتسبب في نشوء ملتقى بينها شديد الاختلاف، وتسمح بتكوين سطوح مخشَّنة. ويسمح التخشين للعظم بالنمو داخل تصدّعات السطح، مؤدياً إلى مساحة سطح تماس أكبر، إضافة إلى التماسك الميكانيكي بين المادة المزروعة ونسيج العظم. ويتصف طَور العظام المعدني بتركيب كيـــميائي وبنية بلورية تتطابق مع تلك التي لهيدروكسي الأباتيت. وقد أُثبت أن طبقات الكبريتات والكربونات والفوسفات المسامية تتفكَّك وتتحلَّل مع مرور الوقت، وفي الظروف الملائمة، يحل محلها نسيج عظمي[146].

ويبدو أن هيدروكسي الأباتيت النقي $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ (HAP) يبقى مستقراً (خاملاً حيوياً). لكن عندما يُمزج مع مواد عضوية أو مع فوسفات الكالسيوم الثلاثي ($Ca_3(PO_4)_2$)، تُصبح المادة المزروعة قابلة للتفكُّك حيوياً[147]. لقد قام فيليب (Filip) وزملاؤه[148] باستقصاء جيل جديد من المواد الحيوية المركَّبة الذكية القائمة على ختشية نيكل ـ تيتانيوم مع طلاء سيراميكي، حيث طُلي الجزء «غير الفاعل» من المادة المزروعة، وهذا يضمن مفعول التعلُّق في بنية العظم. أما الجزء الفعال من المادة المزروعة الذي يتذكَّر الشكل، فيوفر مفعولاً ميكانيكياً، وهذا يضمن تعليقاً أو تثبيتاً مستقراً لشظايا العظم. إن المشكلة المشتركة بين طلاءات السيراميك على صلة بالالتصاق الضعيف نسبياً بين المعدن والسيراميك. وخلافاً للمواد العادية التي هي من قبيل الـ Ti-6Al-4V، أو Co-Cr أو الفولاذيات AISI 316L، فإن كلاً من سيرورة الطلاء وتطبيق مثل هذه المواد المزروعة الذكية على علاقة بالتحوّل الطَوري في ركيزة النيكل ـ تيتانيوم المعدنية.

تبيَّن من البنية الميكرويّة لطلاءات السيراميك، القائمة على هيدروكسي الأباتيت، التي رُسِّبت بالبخ البلازمي على ركائز ختشية من النيكل ـ تيتانيوم، أن تلك الطلاءات ممتازة من حيث متانة الملتقى المعدني/السيراميكي. ومن وجهة نظر الالتصاق، تمتلك هذه

الطلاءات مقاومة أكبر من تلك التي للاصق الإيبوكسي 1200 (30 ~ ميغا باسكال). وقد عُزيت مقاومة الملتقى المعدني/السيراميكي الممتازة تلك التي شوهدت في هيدروكسي الأباتيت والنيكل ـ تيتانيوم إلى تكوُّن رابط كيميائي وفق التفاعل $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 + 2TiO_2\ 3Ca_3(PO_4)_2 + CaTi_2O_5 + H_2O$، وإلى تبديد الطاقة الناجم عن تشكُّل المرتنزيت المحرَّض بالإجهاد، أو عن إعادة التوجيه المرتنزيتي في أثناء إجهاد المادة المركَّبة وإخفاقها. يُضاف إلى ذلك أن موسطات قدرة البخ البلازمي المطبقة تؤثّر في مسامية جُسيْمات طلاء السيراميك وفي اندماجها معاً.



**الشكل 4 ـ 11**: **حلقات لسحب الخيوط الجراحية مصممة لاستعادة أشكالها بعد نشرها من القسطرة.**

**تطويل الأطراف (Lengthening Limbs)**: طَور الباحثون لدى معهد بوليتكنيك رِنسِّلير (RPI) (Rensselaer Polytechnic Institute) في نيويورك تقنية لمعالجة اعوجاج العمود الفقري وتطويل الأطراف. تنطوي الجراحة المعهودة على خطر الشلل عادةً. أما في التقنية الجديدة، فيُسخَّن سلك من ختشية نيكل ـ تيتانيوم من دون إيذائه، وهذا يجعل مفعِّلات متوضعة على طول قضيب فقاري مزروع في الجسم تُقوِّم العمود الفقري، وذلك بتطبيق قوة عليه متحكَّم بها.

**مقاييس وتجهيزات متفرقة (Miscellaneous Instruments and Devices)**: جرى تطوير الآلاف من التجهيزات الطبية الأخرى التي تستغل السلوك الفريد للختشيات. ومن المنتجات الختشية الأخرى قسطرة توسيع الشريان التاجي، حيث لا يكون استخدام الأنابيب المعدنية ناجحاً، ومبارد تنظيف القنوات السنية، ورقع الأورام الوعائية، وسلال التقاط الحصى من القناة الجامعة، وإبر الجراحة، والمقابض القابلة للطي[149]، وعُرى سحب الخيوط الجراحية (انظر الشكل 4 ـ 11).

## تطبيقات السيارات

ثمة صعوبات في تطبيقات الختشيات في السيارات تعود إلى سببين رئيسين: المجال الواسع لدرجات الحرارة المتوقع العمل ضمنه، والتكلفة المرتفعة غير الملائمة لمتطلبات التسويق. من المفترض أن تعمل معظم تجهيزات السيارات، في أثناء تعرّضها لدرجات الحرارة المختلفة في جميع الظروف المناخية في شتى أنحاء العالم. وكان نجاح استخدام الختشيات في تجهيزات السيارات محدوداً بسبب تدهور خواص تذكُّر الشكل مع الوقت الذي ينجم عن التعرض لدرجات حرارة عالية[131]. لكن نجاح الختشيات يقوم أيضاً

على استغلال مزايا خفة الوزن والحلول البسيطة. فعلى سبيل المثال، تُستخدم المفعِّلات الختشية بوصفها بدائل للمفعِّلات الشمعية والثنائيات المعدن في المنظمات الحرارية، لأنها توفِّر مكوِّنات معدنية بسيطة بدلاً من النظم المعقّدة. وتؤدّي حلول الختشيات البسيطة إلى مزيد من تحسين أداء التجهيزة بتفعيلها على نحو أسرع، لأنها يمكن أن تغطس كلّياً ضمن تيار الغاز أو السائل[135].

**صمّام التحكّم في الضغط (Pressure Control Governer Valve)**: استُخدم صمّام تحكُّم يتذكَّر الشكل، جرى تطويره من قبل شركتين Raychem Corporation وMercedes-Benz AG، في سيارات المرسيدس في عام 1989 لتحسين عملية التغيير الآلي الخشنة للسرعة في الطقس البارد. تُستخدم في الصمّام نوابض لولبية من النيكل ـ تيتانيوم لمواجهة مفاعيل ازدياد لزوجة الزيت. وتُغمر وشيعة نيكل ـ تيتانيوم في سائل علبة السرعة. وعند درجات الحرارة المنخفضة، تكون الخليطة مرتنزيتية، وتُجبَر بواسطة نابض فولاذي معاكس على تحريك مكبس. وهذا يُفعِّل آلية لتخفيض الضغط وتسهيل عملية تغيير السرعة. وعند درجات الحرارة العالية، يكون نابض النيكل ـ تيتانيوم أقوى من النابض المعاكس، فيدفعه في الاتجاه الآخر لاستمثال ضغط تبديل السرعة[135].

بسبب الأداء المثالي الذي تحقَّق في هذا التطبيق، يُعتبر تصميم صمّام التحكُّم المذكور واحداً من أنجح التصاميم تقنياً واقتصادياً في صناعة السيارات. فدرجات حرارة العمل تقع ضمن المجال الذي تتقبله الخليطة، والقوة المطلوبة منها منخفضة، والعمر المنتظر منها يقل عن 20 000 عملية تبديل سرعة. وهذه الظروف تخفض إمكان التعب وتدنّي خواص الختشية في أثناء مدة حياتها[150].

**فُلْكة تتذكر الشكل من الشركة تويوتا (Toyota Shape Memory Washer)**: طوَّرت شركة Toyota Motor Corporation فُلكات نيكل

ـ تيتانيوم من الطراز Belleville واستخدمتها في السيارتين Sprinter وCarib لتخفيف الخشخشة وضجيج الاهتزاز عند درجات الحرارة المرتفعة. إن كتل السيارات المجمعة، من قبيل علب السرعة، تتكوَّن غالباً من كثير من المعادن المختلفة. وأثناء ارتفاع الحرارة في الاستخدام العادي، تؤدّي فوارق معدّلات التمدّد الحراري للمعادن إلى انحلال مثبّتات الكتل وخشخشتها. لذا صُمِّمت الفُلكة لتغيِّر شكلها عند ارتفاع درجة الحرارة، مولِّدة قوة تصل إلى 1000 نيوتن، وهذه قوة كافية لإحكام تثبيت مكوّنات الكتلة وتخفيض ضجيج الخشخشة غير المرغوب فيه[135].

**فُلْكة امتصاص الصدمة (Shock Absorber Washer)**: صُمِّمت هذه القطعة المشابهة لصمّام التحكُّم أيضاً لمواجهة لزوجة الزيت العالية عند درجات الحرارة المنخفضة. توضع الفُلكات الختشية في صمّامات امتصاص الصدمات لتغيير أدائها عند درجات الحرارة الباردة والساخنة[135].

**مروحة ذات قابض لاستخدامها في السيارات (Automotive Clutch Fan)**: صُمِّمت تجهيزة ختشية لتعمل كآلية تشغيل وإيقاف لمروحة تبريد المحرّكات التي تبرَّد بالهواء. تقوم هذه التجهيزة بتفعيل وشيعة ختشية قائمة على النحاس للتحكم في عمل قابض مروحة. تُفعَّل الوشيعة عند درجة قريبة من 50 مْ، فتتعشَّق مع قابض يُدوِّر مروحة تبريد المحرّك. وتتسارع المروحة مبرِّدة المحرّك حتى تنخفض درجة حرارته، فتُجبر الوشيعة الختشية على الانفلات من القابض بواسطة مجموعة من أربعة نوابض فولاذية شريحية معاكسة، وتتوقف المروحة عن الدوران. إن هذه التجهيزة مصممة لتخفيف ضجيج المحرّك وتقليل استهلاك الوقود عندما تكون السيارة متوقفة عن السير[131].

صُمِّم العديد من الحلول الختشية ونُفِّذ لتحقيق بعض المتطلبات القاسية والواسعة النطاق لمشاريع هندسة مدنية وتطبيقات صناعية متنوعة. صحيحٌ أن قيود خواص الختشيات تحد غالباً من استخدامها في التطبيقات الصناعية (بسبب مجال عملها الحراري الضيق مثلاً)، إلا أن الكثير من الحلول والتصاميم الختشية الخلاقة التي حسَّنت بنجاح تجهيزات وتصاميم صناعية تقليدية أو حلت محلها.

**قارنات الأنابيب (Pipe Couplings)**: كُيِّفت القارنات الشديدة التبريد، التي طورتها شركة Raychem للصناعات الجوية والفضائية، لاستخدامها في عمليات أعماق البحار، وفي الصناعات الكيميائية والنفطية. فقد ساعد تطوير الخليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ نيوبيوم ذات حلقة التباطؤ العريضة على توسيع استخدام تلك القارنات التي تتذكر الشكل. إذا شُغِّلت القارنات عند درجة حرارة الغرفة، ثم بُرِّدت بالنيتروجين السائل كي تتوسَّع، فإنها لا تستعيد شكلها الأصلي الذي كان قبل التبريد إلا إذا سُخِّنت حتى ما يقارب 150 مْ. وهذا يمكِّن من خزن ونقل القارنات المتوسِّعة دون الحاجة إلى النيتروجين السائل. وعند تجميعها مع الأنابيب وتسخينها لتتحول إلى أوستنيت، تحتفظ بمقاومتها حتى عند درجات أقل من ـ 20 مْ[150].

**عناصر إنشائية (Structural Elements)**: يمكن استخدام المواد الختشية الفائقة المرونة لزيادة المقاومة والتبديد الحراري في المباني. وثمة مشروع الآن قيد التنفيذ لتقوية كاتدرائية سانت فرانسيس في أسِّيسي بإيطاليا، بعد الأذى الشديد الذي لحق بها في أثناء زلزال عام 1997. سوف توضع أسلاك ختشية تسلسلياً مع أربطة فولاذية أفقية لربط جدران الكاتدرائية بسقفها. فإذا حصل زلزال، سمح السلوك الفائق المرونة للأسلاك بحصول حركة مرنة شديدة الانفعال من دون

حصول انقطاع. وينعكس الانفعال بعدئذٍ بواسطة قوة لطيفة ضعيفة (باستغلال المنطقة المستقرة السفلى من منحني الإجهاد والانفعال). من المتوقَّع أن يتحمَّل هذا التصميم الإنشائي الختشي زلزالاً أقوى بـ 50 في المئة من ذاك الذي يمكن أن تتحمله الكاتدرائية لو كانت التقوية بقضبان فولاذ عادية فقط[151].

أجرى ويتَّكر (Whittaker) وزملاؤه[152] دراسة طوّروا خلالها القاعدة التقنية لتصميم تجهيزات ختشية لتبديد طاقة الإنشاءات العمرانية، التي تنجم عن الزلازل، من خلال (**1**) توصيف سلوك المواد الأساسية لاستخدامها في تصاميم نماذج ختشية تُبدِّد الطاقة، و(**2**) تطوير تصاميم مفاهيمية لتجهيزات تخميد إنشائية ختشية، و(**3**) إجراء تحليل تفصيلي للاستجابة الزلزالية لمبنى إسمنتي معيّن غير مطاوع مع، ومن دون، مبدّدات طاقة ختشية في ظروف اهتزاز زلزالي معتدلة، و(**4**) إجراء تحليل لموسطات يُحاكي المبنى المنتقى، محدَّث بمبدّدات طاقة ختشية تتصف بخصائص حلقة تباطؤ مختلفة عن تلك المستخدمة في التحليل التفصيلي. ويمكن تشكيل الختشيات لتحقّق مفعول تذكُّر للشكل أو مفعول مرونة فائقة (Superelastic Effect (SEE)، إذ أُثبت أن تجهيزات تبديد الطاقة القائمة على أيٍّ من المفعولين ممكنة عملياً. وصُمِّمت نماذج عدة ختشية لتبديد الطاقة، وصُنع مبدّد واحد. وبناءً على ذلك، زيدت مناعة أحد المباني الذي يمثل نموذجاً لمباني وزارة الدفاع الأميركية، من الزلازل بإضافة مبدّدات طاقة ختشية إليه.

### تقوية الإنشاءات واستبعاد مخاطر التفجير

يمكن الآن تقوية الإنشاءات الكبيرة، من قبيل الإنشاءات الأنبوبية الفولاذية الشائعة في صناعة النفط والغاز، من دون الحاجة إلى اللحام، أو أي تقنية تشغيل ساخنة خطرة أخرى. يتضمّن هذا

النهج استخدام أسافين ختشية قابلة للتمدُّد، وهي مجموعة من الخلائط المعدنية التي تتصف بالمقدرة على الخضوع إلى تحولات لدنة عند درجات حرارة منخفضة، ثم تستعيد أشكالها الأصلية حين تسخينها، مولِّدةً بذلك قوى رفع شديدة. ويمكن استغلال هذه الأسافين لتوزيع الأحمال القائمة والأحمال الناجمة عن إنشاءات جديدة، وهذا شيء ليس ممكناً عادةً. إذ أصبح من الممكن الآن تقوية الإنشاءات بأمان وكفاءة قصوى من دون الحاجة إلى إيقاف عمليات المنشأة. يُضاف إلى ذلك أن هذه الختشيات يمكن أن تُستخدم في العديد من تقنيات القمط والرفع المختلفة العالية الكفاءة، موفرة إمكان القيام بأعمال إنشائية خالية من مخاطر الانفجار(153).

**كسَّارات الصخور (Rock Breakers)**: تُستخدم الختشيات عوضاً عن المتفجرات في التدمير على نحو مشابه من الناحية الوظيفية لآلية التحرير القائمة على تهشيم البرغي ®Frangibolt المستخدمة في الصناعة الجوية والفضائية. توضع أسطوانة ختشية مضغوطة ضمن شق، في الكتلة المراد تحطيمها، وتُسخَّن، فتتمدَّد مولِّدة قوى استعادة للشكل تكفي لتدمير الصخور والإنشاءات الإسمنتية. استُخدمت هذه الطريقة في روسيا لتوليد قوى تدمير تزيد على 100 طن ثقلي(114). واستخدمت شركة يابانية كسَّارات صخور مكوَّنة من قضبان نيكل ـ تيتانيوم أيضاً. واستخدمت تلك الشركة قضباناً، طول الواحد منها يساوي 29 ملم، وقطره يساوي 15 مم. وضُغطت القضبان وحُشرت في ثقوب في الصخرة، ثم سُخِّنت بواسطة مسخنات كهربائية مركَّبة فيها، فتمدَّدت وفلقت الصخرة. وقد بيَّنت الاختبارات نشوء قوى تصل إلى 14 طن ثقلي عند تسخين القضبان حتى 120 مْ(114).

**التحكّم بارتخاء خطوط الطاقة الكهربائية (Power Line Sag Control)**: تُستخدم المواد الختشية لدرء ارتخاء أو تدلي الأسلاك

الهوائية المستخدمة في نقل الطاقة الكهربائية. باستخدام الختشيات الحرارية، جرى اختبار التحكّم بارتخاء خطوط الطاقة بنجاح في كندا وأوكرانيا وروسيا[154]. عندما ترتفع درجة حرارة الخطوط نتيجة ارتفاع حرارة الجو المحيط، أو بسبب ازدياد شدة التيار المار في الأسلاك، تنزع تلك الأسلاك إلى الارتخاء. لذا تعلَّق خطوط الطاقة بأسلاك نيتينول تمتط عند درجات الحرارة الباردة، وتتقلّص عند ارتفاع الحرارة لتمنع تدلي الخطوط.

**التحكّم بارتخاء أنابيب البخار (Steam Pipe Sag Control)**: على غرار خطوط الطاقة الكهربائية، تُستخدم حاملات أنابيب مصنوعة من النيكل ـ تيتانيوم لتخفيف تدلي أنابيب البخار الكبيرة التي يسخّنها البخار. وهذا يخفض تفاوتات توزُّع الأحمال في الأنابيب، بدلاً من أن يدرأ تغيّر الشكل الهندسي الذي يحصل في حالة خطوط الطاقة[154].

## نظم توليد الطاقة

انغمس معهد البحوث المركزي لصناعة الطاقة الكهربائية في طوكيو[155] في بحث لتطوير نظام توليد طاقة كهربائية باستخدام ختشيات قائمة على النيكل ـ تيتانيوم بغرض الاستفادة من سخونة العادم المنخفضة الحرارة لتوليد الطاقة. لا يستخدم هذا النظام السخونة مباشرة، بل يحوِّلها إلى طاقة حركية باستخدام محرّك ختشي، ويخزن الطاقة، ويدوِّر مولّداً عند الحاجة.

عند محاولة استغلال الحرارة المتولّدة من محطات توليد الطاقة، أو من معامل حرق النفايات، بدلاً من تبديدها، سوف يكون استخدامها مقتصراً على المناطق القريبة فقط، لأن الفقد الحراري سوف يكون كبيراً جداً إذا نُقلت إلى مسافات طويلة. لذا جرت

محاولة لتحويل هذه الحرارة إلى كهرباء باستخدام الختشيات التي يمكن تفعيلها عند درجات حرارة منخفضة وفوارق حرارية صغيرة. واستخدام خليطة النيكل ـ تيتانيوم كعنصر لتحويل الطاقة، سوف يمكِّن من الحصول على طاقة حركية من مصادر طاقة منخفضة درجة الحرارة متاحة غير مستغَّلة.

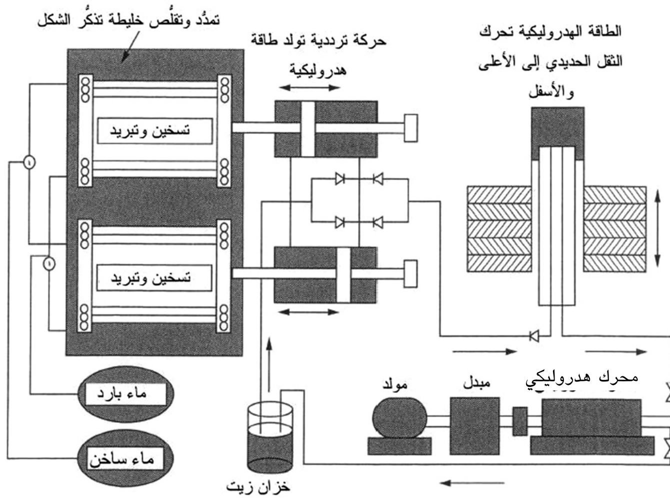
عند ضغط مادة ختشية بانفعال يتجاوز مرونتها الحدية، يبقى جزء من الانفعال فيها حتى بعد رفع الحمل عنها. وحين تسخينها إلى ما فوق درجة حرارة تحوُّلها الطَوري، تستعيد شكلها الأصلي بقوة استرجاع شديدة. إن فريق البحث يبذل كل جهده لاستغلال شبه المرونة هذه التي في الختشيات لتوليد الطاقة.

لذا، استخدم فريق البحث فروق القوى المتولّدة عن تمدُّد المادة الختشية وتقلُّصها في محرّك مكبسي ذي حركة تردّدية. وبغية توليد الطاقة، جرى تحويل الحركة التردّدية إلى ضغط هيدروليكي لخزن الطاقة، واستُخدم مولد كهربائي يُدوِّره محرّك هيدروليكي.

يتألف نظام توليد الطاقة الجديد من محرّك ختشي يولّد طاقة حركية من فروق درجة الحرارة، ومراكم ثقلي يعمل كوحدة خزن للطاقة، ومحرّك هيدروليكي، ونظام نقل هيدروليكي، ومولد كهربائي. وتوجد ضمن المحرّك حجرتان معزولتان حرارياً من النوع الحوضي، وكل منهما مزوّد بـ 26 قضيباً ختشياً، وأحد طرفي كل قضيب مثبت، والثاني مرتبط بمكبس أسطواني هيدروليكي. تساوي أقطار تلك القضبان المستقيمة 2 مم، وتساوي أطوالها 1 م. ويتحقَّق التحويل إلى طاقة حركية بالإرسال المتناوب لماء ساخن درجة حرارته تساوي 85 مْ، وماء بارد درجة حرارته تساوي 20 ـ 25 مْ، من خزّانَي ماء إلى الحجرتين. وتستعيد الحجرتان الختشيتان شكليهما، وبالتزامن في ما بينهما، تولّدان قوة نتيجة استعادة الشكل تحرك مكبسين هيدروليكيين أسطوانيين.

وتُراكَم الطاقة الهيدروليكية المُحصَّلة بهذه الطريقة في وحدة خزن الطاقة. تُخزّن الطاقة المتولِّدة في مراكم ثقَلي يتألَّف من كتلة فولاذية تزن 2 طن، حيث تُنقل الطاقة بواسطة زيت عالي الضغط إلى المراكم لترفع الكتلة الفولاذية إلى الأعلى، متحوِّلةً بذلك إلى طاقة كامنة. وعند فتح الصمّام الموجود في مخرج أسطوانة المراكم، يتدفق الزيت في محرّك هيدروليكي يقوم بتدوير مولّد الكهرباء. وبضبط مقدار فتح الصمّام، يمكن التحكُّم بالقدرة الكهربائية المتولِّدة.

استخدم فريق البحث ختشية يتغيّر طولها بين حالتي التمدُّد والتقلُّص بمقدار 12 مم، (أي بعامل انفعال يساوي 1.2 في المئة)، وأجرى تجارب بدورات تناوب تساوي 1 ـ 2 دقيقة، ونجح فعلاً في توليد 100 واط من الكهرباء مدة 30 ثانية (أي طاقة مقدارها 0.8 واط ساعة). للتمكين من الاستغلال التجاري لهذا المعمل، يجب أن تستطيع الختشية المستخدمة العمل مدة 000 500 دورة تمدُّد وتقلُّص على الأقل (انظر الشكل 4 ـ 12).




**الشكل 4 ـ 124: آلية توليد طاقة باستخدام خلائط تذكُّر الشكل**[155].

**رصّ نـوى الـمـحـولات (Transformer Core Compression)**: تساعد الختشيات على رصّ نوى المحولات الكهربائية، وهذا جانب مهم من جوانب تصميم المحول. تشوَّه براغي نيكل ـ تيتانيوم محورياً قبل استخدامها، وتُستخدم لتجميع صفائح نوى المحولات الكبيرة، ثم تسخّن لتتقلَّص، وتولِّد قوة ضغط شديدة على الصفائح. إن هذا الحل الختشي يتفوق على التقنيات المعتادة في رصّ الصفائح بالبراغي والعزقات، حيث توضع الصفائح في الخلاء لسحب الهواء من بينها، ثم تُخرج من الخلاء لتثبيت البراغي. لكن مع أن استخدام الختشيات يمثّل تحسيناً للتصميم من الناحية التقنية، فإن حل النيكل ـ تيتانيوم يتطلب براغي تتراوح أقطارها بين 50.8 و76 مم، وهذا أكبر مما هو مثالي للمنتجات الختشية[154]. لذا فإن تكلفة معالجة وتشغيل البراغي يمكن أن تقضي على الفوائد المجنية في عملية التجميع.

**تجهيزات الشدّ المتعدّد الأسلاك (Multiwire Tension Devices)**: تُستخدم التجهيزات الختشية لزيادة سلامة الأنابيب، فهي تمنع نشوء التصدّعات وانتشارها برص المناطق الضعيفة من الأنبوب باستخدام مفهوم الشدّ المتعدّد الأسلاك الذي طُوِّر لدى وكالة الطاقة النووية السويدية. تُلفّ قارنة لها شكل الكم المشقوق بسلك ختشي قَبْلي الانفعال، ويُثبت طرفَا السلك، وتوضع القارنة على وصلة لحام في الأنبوب. ثم تُسخَّن المجموعة فيتقلَّص السلك ويشدّ القارنة بإحكام حول نقطة اللحام. تُستخدم هذه التقنية عادةً لتحسين مقاومة الإجهاد في مواضع اللحام، مانعةً التصدّع الناجم عن التآكل الإجهادي، وتُمسك بنهايتي الأنبوبين إذا انكسرت نقطة اللحام[154].

**لصيقات الدلالة (Indicator Tags)**: يمكن استخدام الختشيات للدلالة على نقاط الحرارة المرتفعة في نظام ما. تُحنى الأسلاك التي تُستخدم لصيقات، يدوياً عند درجة حرارة معيّنة، وتعود اللصيقات إلى استقامتها عند وصول الحرارة إلى مستوى محدّد (درجة حرارة

انتهاء التحوُّل الأوستنيتي للمادة ($A_f$). فيلاحظ المشغّلون ذلك، ويعالجون سبب ارتفاع الحرارة[154].

**نظم مراقبة درجة الحرارة طراز (Temperature (sentinel® Monitoring System)**: تُستخدم الختشيات في جانب التوتر المنخفض من محولات تخفيض التوتر للدلالة على درجة الحرارة العظمى وإغلاق مفتاح عند درجات حرارة محدّدة. تُستخدم هذه الآلية الختشية لتوفير معلومات للمراقبة، بحيث يدرأ المشغلون التسخين الزائد للمحوّلات[1].

**أعمدة التشكيل بالقولبة بالحقن (Injection Holding Mandrels)**: غالباً ما يُستخدم قضيب مدور عديم المركز وسلك مصنوعان من النيكل ـ تيتانيوم عوضاً عن عمود القولبة المعرض للتشوّه. تقولَب اللّدائن حول عمود تشكيل من النيكل ـ تيتانيوم فائق المرونة. وعند سحب العمود من البوليمر المصلَّد، وبرغم التداول الخشن، يعود العمود إلى شكله الأصلي.

**المحرّكات الحرارية (Heat Engines)**: تُستخدم العناصر الختشية في المحرّكات الحرارية لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية من خلال السلوك الحراري لمفعول تذكُّر الشكل. وقد نتج من التحليلات الترموديناميكية للمحرّكات الحرارية المثالية النظرية القائمة على الختشيات مجالاً واسعاً من القيم المحسوبة للمردود، إلا أن أكثر الحسابات تفصيلاً تعطي قيَماً للمردود تساوي 2 ـ 4 في المئة فقط[156]. لقد بُني عدد كبير من النماذج الأولية لهذه المحرّكات باستخدام عناصر ختشية تغيّر أشكالها حينما تنتقل بين خزان بارد وآخر ساخن. لكن عوامل الفقد، ومنها الاحتكاك ومفاعيل حلقة التباطؤ المتأصلة في المادة، والطاقة اللازمة للحفاظ على فارق في درجة حرارة الخزانين، تجعل المردود العملي لهذه المحرّكات

الحرارية منخفضاً جداً إلى حد لا يمكن معه اعتبارها محوّلات طاقة منخفضة التكلفة عالية الإنتاج.

يمثل السعي إلى محرّك حراري ثوري قائم على الختشيات حدثاً شائعاً في تصميم تطبيقات الختشيات. إن المخترعين، المأسورين بإمكان توفير الختشيات حلول تصميمية فريدة وجذريّة، يسعون غالباً إلى الحلول الإبداعية قبل استكمال تحاليل التكلفة في مقابل المزايا. إلا أن كثيراً من التطبيقات الختشية (كالمحرّكات الحرارية)، برغم كونها ملائمة للعرض بوصفها نماذج، لا تحقّق المردود المطلوب، من حيث التكلفة وتوليد الطاقة، الذي يكفل استخدامها بدلاً من التقنيات الشائعة.

## متفرقات

هناك تطبيقات أخرى عدّة للختشيات تستحق الذكر.

**المواد المركَّبة المرنة التي تتذكَّر الشكل (Elastic Memory Composite) (EMC)**: خذ بوليمراً يتذكَّر الشكل، وقوِّه بالألياف، تحصل على أساس لتجهيزة قادرة على حمل 30 ضعفاً من وزنها بهدوء. بتمويل من وكالة الفضاء الأميركية NASA ووكالة الصواريخ القذفية التابعة لوزارة الدفاع الأميركية، قامت شركة Composite Technology Development بتطوير مادة مركَّبة مرنة تتذكَّر الشكل، تساوي كثافتها خُمس كثافة الختشيات المعتادة. تُفعَّل هذه المادة حرارياً، وهي يمكن أن تُسخَّن وتشوَّه ثم تبرَّد لتأخذ شكلاً جديداً. ثم تستعيد شكلها الأصلي بتسخينها من جديد، مطبِّقةً قوّة أكثر تدرجاً من تلك التي في الختشيات المعتادة، وهذا ما يُخفض خطر التلف بالصدمة. تخضع هذه المادة حالياً إلى اختبارات بغرض استخدامها في الفضاء، إضافة إلى أن لها تطبيقات أرضية متنوعة من قبيل استخدامها في الأنابيب المصنوعة من مواد مركَّبة، حيث يمكن

تسخين الأنبوب ولفّه على بكرة من دون تشويه مقطعه العرضاني، وهذا ما يمكِّن من استخدام أنابيب تصل أطوالها حتى 300 م.

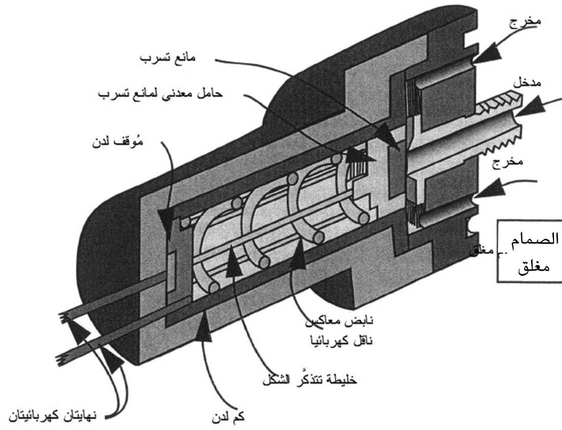
### مفاتيح نقل حراري ختشية[157] (Thermal-Conduction Switches)

**SMA**: اقتُرح استخدام تجهيزات متغيرة الناقلية الحرارية مكوَّنة من مفعِّلات ختشية في الحالات التي يُرغب فيها في التحكّم بالنقل الحراري، أي زيادته عندما ترتفع درجة الحرارة عن قيمة معيّنة، أو إنقاصه عندما تقل الحرارة عن تلك القيمة. يمكن استخدام مفاتيح النقل الحراري الختشية المقترحة، على سبيل المثال، لوصل تجهيزات إلى مصرِّف حراري يُصرِّف الحرارة الزائدة، ولفصلها عنه للحفاظ على درجة حرارة العمل المطلوبة حين انخفاض درجة الحرارة. مقارنة بالأنابيب الحرارية المتغيرة الناقلية مع آليات التنظيم الحراري التي تحتوي على مكوّنات من شرائط ثنائية المعدن ونوابض ووصلات أخرى، تُعتبر مفاتيح النقل الحراري الختشية بسيطة ورخيصة وموثوقة.

أتى المبدأ الأساسي لعمل مفتاح نقل الحرارة الختشي من تطبيق يحصل فيه النقل الحراري من مكوّنات حارّة إلى مشعّ بارد عبر مناطق التماس في وصلات مثبتة بالبراغي. ويعتمد النقل الحراري على مقدار التماس الأولي في كل وصلة. يمكن بناء مفتاح نقل حراري ختشي ببساطة بوضع فُلْكة ختشية مصممة على نحو ملائم تحت رأس برغي تثبيت. عندما تنخفض درجة الحرارة عن درجة حرارة التحول الطَوري للفُلكة أو ترتفع فوقها، تتقلَّص تلك الفُلكة أو تتمدَّد محورياً بمقدار كافٍ لزيادة ضغط التماس مع البرغي أو تخفيضه، وبذلك يحصل التحكُّم بالنقل الحراري عبر منطقة التماس في الوصلة. يمكن صنع فُلكات ختشية مختلفة بدرجات حرارة تحوُّل طوري مختلفة وفق ما تتطلبه التطبيقات.

**الصمّامات الغازية[158] (Pneumatic Valves)** : تُخفِّض الاستعاضة عن الوشيعة الكهربائية المغنطيسية في الصمّام الغازي بختشية نيتينول تكلفة الصمّام بنحو 60 في المئة. لماذا؟ مقارنة بصمّام الوشيعة، يستهلك صمّام النيتينول طاقة أقل، ولا توجد فيه عملياً إصدارات صوتية أو كهربائية أو مغنطيسية، ويستطيع تعديل التدفق الغازي تناسبياً، ولا يتطلب سماحيات تصنيع صارمة، ويتألّف من مكوّنات أقل، إضافة إلى كونه أصغر حجماً، وأخف وزناً، وغير مغنطيسي.

كيف يعمل هذا الصمّام؟ يعمل سلك ختشي حراري التفعيل مفعِّلا للصمّام. فهو يتقلّص حين تغذيته بالكهرباء، ويسترخي حين قطعها عنه. ويضغط نابض على مانع التسرّب في مقعده حين انقطاع الكهرباء. وحين تطبيق التغذية الكهربائية، يسخن سلك النيتينول ويسحب مانع التسرّب من مقعده، سامحاً للهواء بالتدفّق (انظر الشكل 4 ـ 13).




**الشكل 4 ـ 13: النهايتان الكهربائيتان والمفعِّل وحامل مانع التسرب والنابض تكوِّن كلها دارة كهربائية مستمرة خالية من القواطع الميكانيكية، وبذلك تلغي الحاجة إلى التماسات المنزلقة وما تسببه، من حدوث قوس كهربائية (شرر). بتطبيق إشارة كهربائية مربعة معدَّلة على النهايتين يمكن التحكّم بوضعية مانع التسرب، ومن ثمَّ بتدفق الغاز.**

## نوابض لتجهيزات العزل الصوتي[159]

ثمة العديد من التطبيقات التي توفّر فيها تجهيزات العزل الصوتي المعدنية مزايا جلية مقارنة بالعوازل المطاطية. وتتجلى هذه المزايا بوضوح في التطبيقات التي توجد فيها غازات وزيوت ووسيطات تفاعل آكلة ودرجات حرارة عالية، أو مستويات تسخين شديدة التغير، التي جميعها يُؤثّر في المطاطيات.

بيَّن غريسَّر (Graesser) وأكّد في دراسته[159] أنه يمكن تحقيق تحسين كبير جداً في تخميد الاهتزازات الصوتية في النوابض الضعيفة التحميل باستخدام ختشيات نيكل ـ تيتانيوم مادة للنابض. واقترح أنه يمكن تصميم قطع عازلة صوتياً ذات كفاءة عالية من مواد ختشية، وأن النوابض ليست إلا واحدة من كثير من أنواع العوازل الصوتية. حتى إنه يمكن تحقيق تصاميم أفضل باعتماد مفهوم النابض الصفيحي الحلقي، أو كابل الأسلاك الختشية، وغيرهما. فالكابل الختشي المصنوع على شكل حبل من الأسلاك الختشية يمكن أن يكون مضاعَف الكفاءة من حيث تخميد الاهتزازات الميكانيكية، لأن التخميد يحصل لسببين: التخميد الختشي الطبيعي، والاحتكاك ما بين الألياف الناجم عن الحركة النسبية بين أسلاك الكابل. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن تزويد تجهيزة العزل الختشية بخصائص مهمة من قبيل الاستشعار وتكييف الجساءة والتفعيل بالقوة. والتجهيزة «الذكية» حقاً هي تلك التي تكامل كل تلك الخصائص معاً في خوارزمية تحكّم واحدة. تجدر الإشارة إلى أن هذه المفاهيم تتطلب مزيداً من الدراسة والبحث والتطوير والاختبار.

## الإلكترونيات

اعتمدت صناعة الالكترونيات المواد الختشية للمقابس الكهربائية في المقام الأول. إن جميع التطبيقات الصناعية تقريباً (ومنها الروبوتية)، تستخدم قابلية المواد الختشية للتفعيل إلكترونياً بغية

استغلال السلوك الحراري لتذكُّر الشكل، إلا أن ثمة بضعة أمثلة تخص الصناعة الإلكترونية وحدها فقط.

**المقبس الكهربائي طراز (Cryocon®) (Electrical Connector)**: صُمِّم مقبس ختشي لوصل كابل يغلف أسلاكاً كهربائية مجدولة مع قابس انتهائي. والمقبس هو غمد حلقي من الختشيات موضوع حول أنبوب مشقوق الجدار، مخروطي الشكل، يتوسع قطره حين تبريده بسبب القوى القطرية في الأنبوب. وحين تسخينه حتى درجة حرارة الغرفة، تستعيد الحلقة شكلها الأصلي ذا القطر الصغير، فتقمط شُعَب المخروط الأنبوبي معاً لتحقيق وصلة كهربائية محكمة[160][161].

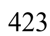
**مقبس عديم ممانعة الحشر (ZIF Connector)**: صُمِّم مقبس كهربائي عديم ممانعة الحشر لتسهيل تجميع لوحات الدارات المطبوعة وزيادة جودتها (انظر الشكل 4 ـ 14). تكون شريطة من النيكل ـ تيتانيوم لها الشكل U مرتنزيتية عند درجة حرارة الغرفة، وتُجبر على قمط اللوحة بواسطة قوة نابض إغلاق عادي. وحين تسخين الشريطة بتيار كهربائي، تتغلب على قوة نابض الإغلاق وتفتح فكيها، سامحة بإقحام وإخراج لوحة دارة مطبوعة من دون إعاقة. إن هذا التصميم يجمع ما بين بساطة التجميع وتحقيق تماس كهربائي قوي بين لوحات الدارات المطبوعة واللوحة الأم[162].

تتكوّن هذه الأداة من قوابس ومقابس تصل بين لوحات فرعية تحمل العديد من الدارات المتكاملة والعناصر السيراميكية العالية الكثافة، ولوحات دارات مطبوعة رئيسة. تُمكِّن هذه التقنية المهندسين من ربح ما يصل إلى 40 في المئة من مساحة اللوحة، وتوفّر 100 خط إشارة إلكترونية في الإنش الواحد.

إن تقانة المقبس الجديد تقوم عملياً على تقانتين راسختين هما: الطباعة الضوئية لحفر التماسات على الدارات المرنة، وهذا ما يسمح بزيادة عدد التماسات في مساحة معيّنة، وتقانة الختشيات المتمثلة

بعنصر النيكل ـ تيتانيوم ضمن المقبس. حينما تسخِّن وحدة تغذية منخفضة الجهد الكهربائي الخليطة، تنفتح نوابض المقبس متيحة إقحام لوحة الدارة المطبوعة من دون احتكاك.

**الشكل 4 ـ 14: رسم توضيحي لمأخذ ذي مقاومة حشر تساوي الصفر من[162] بناء على موافقة المؤلف.**



## المفعِّلات الميكرويّة المقاس

عولجت الختشيات بنجاح لتكوين مفعِّلات من أغشية رقيقة لاستخدامها في تجهيزات تفعيل ميكرويّة، ومنها الصمّامات والمفاتيح الصغيرة والنظم الإلكترونية الميكانيكية الميكرويّة[163].

تُوضَّع أغشية نيكل ـ تيتانيوم بالترذيذ على ركائز سليكونية، وتُصنَّع المفعِّلات بالحفر الكيميائي وسيرورات الطباعة الضوئية. وقد صُنعت تجهيزات أقطارها تساوي 1 ملم، وسماكتها تساوي 3 ميكرون، معطيةً مفعِّلات ضئيلة من قبيل الصمّامات الميكرويّة التي تتحكَّم بجريان السوائل والغازات. إن هذه المفعِّلات المصنوعة من غشاء النيكل ـ تيتانيوم تحقِّق إرخاء انفعال يصل حتى 3 في المئة[164].

## الأغشية الرقيقة المصنوعة من النيكل ـ تيتانيوم

حضَّر إيشيدا (Ishida) وزملاؤه[165] أغشية رقيقة من خليطة تيتانيوم ـ 51.3 في المئةذ نيكل بالترذيذ. وكانت تلك الأغشية محاليل عولجت عند درجة حرارة 973 كلفن مدة ساعة، ثم عُتِّقت عند درجات حرارة مختلفة بين 573 و773 كلفن فترات مختلفة، بلغت 1 و10 و100 ساعة. وبعد المعالجة الحرارية، اختُبرت خاصية تذكُّر الشكل فيها بجهاز اختبار حراري ميكانيكي. وجرى تقييم مفاعيل التعتيق في خواص تذكُّر الشكل، من قبيل الإجهاد الحدي لتحريض التشوّه الانزلاقي، والانفعال الكبير جداً القابل للعكس، ودرجات حرارة الطَور R والتحولات المرتنزيتية، باستخدام صور مجهر النفاذ الإلكتروني (Transmission Electron Microscop) التي أُخذت للبينة الميكرويّة لأغشية رقيقة معتَّقة. وقد تأكد وجود رواسب الـ $Ti_3N_4$ في جميع الأغشية المعتقة. وعندما كان قطر حُبيْبة الراسب أقل من 100 نانومتر، كانت خواص تذكُّر الشكل شديدة الحساسية للبنية

الميكرويّة. ووُجد أيضاً أن مفاعيل التعتيق في خواص تذكُّر الشكل في أغشية النيكل ـ تيتانيوم الرقيقة الغنية بالنيكل متوافقة تقريباً مع تلك التي شوهدت في عيّنات جَسِيمة، ولذا يمكن التحكّم بخواص تذكُّر الشكل في أغشية النيكل ـ تيتانيوم الرقيقة الغنية بالنيكل الموضَّعة بالترذيذ بالطريقة نفسها المستخدمة في حالة العيّنات الجَسِيمة[165].

وادعى بنداهان (Bendahan) وزملاؤه[166] أن واحدة من العقبات الرئيسة في وجه تطوير تطبيقات تستخدم أغشية النيكل ـ تيتانيوم الختشية هي صعوبة التحكّم بتركيبها الكيميائي، لأن درجات حرارة التحوُّل الطَوري للنيكل ـ تيتانيوم شديدة الحساسية لتركيب الخليطة. وبيَّنوا أنه يمكن استخدام مطياف الإصدار الضوئي (Optical Emission Spectroscopy) لمراقبة تركيب أغشية النيكل ـ تيتانيوم في أثناء توضيع الرذاذ، وأن العامل الذي يتحكَّم بتركيب الأغشية هو حاصل ضرب ضغط غاز الترذيذ بالمسافة بين المرذاذ والركيزة. فقد وجدوا علاقة خطية بين نسبة شدة الإصدار الضوئي لذرّات النيكل والتيتانيوم وتركيز النيكل في الغشاء الرقيق.

وباستخدام مطياف الإصدار الضوئي، تمكنوا من التحكُّم بتركيب أغشية رقيقة $Ni_x\text{-}Ti_{1-x}$ في كامل مجال مفعول تذكُّر الشكل ($0.485 < x < 0.535$). وهذا ما سهّل تطوير تطبيقات أغشية النيكل ـ تيتانيوم.

وحضَّر ميازاكي (Miyazaki) وزملاؤه[167] أغشية رقيقة من النيكل ـ تيتانيوم والنيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس بالترذيذ بماغنترون تردّدات راديوية R. F Magnetron. وحدَّدوا التركيب بواسطة التحليل المكروي بالأشعّة السينية ذات المسبر الإلكتروني، بوجود نحاس بنسبة ذريّة تقع بين 0 و13.7 في المئة.

وقيست التحوُّلات، وما رافقها من خواص التشوّه، بقياس الحرارة بالمسح التفاضلي، وقياس انعراج الأشعّة السينية (X-ray Diffractometry)، وباختبار الدورات الحرارية الثابتة الإجهاد. وفي ما يلي النتائج التي حصلوا عليها:

**1** ـ أبدت أغشية الخليطة الثنائية نيكل ـ تيتانيوم الغنية بالنيكل مفعول تعتيق جعل درجات حرارة التحوُّل الطَوري تتغيّر على مجال واسع، في حين أن نظيراتها الفقيرة بالنيكل لا تُبدي مثل هذا المفعول.

**2** ـ أبدت أغشية النيكل ـ تيتانيوم الفقيرة بالنيكل تحوُّلاً طورياً وحيد المرحلة بين الطَور الأب والطَور المرتنزيتي، في حين أن نظيراتها الغنية بالنيكل أبدت تحوُّلاً طورياً معيّنياً قبل التحوُّل المرتنزيتي.

**3** ـ أبدت أغشية النيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس، التي تقل فيها نسبة النحاس عن 9.5 في المئة ذ، تحوُّلاً طورياً وحيد المرحلة مع ما يُرافقه من تشوّه بين الطَور الأب والطَور المرتنزيتي، في حين أن غشاء نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس، تساوي فيه نسبة النحاس 9.5 في المئة ذ، أبدى تحوُّلاً ذا مرحلتين مع ما يرافقه من تشوُّه بين الطَور الأب، والطَور المتوازي المستطيلات والطَور المرتنزيتي.

**4** ـ جرى تحديد ثوابت الشبكة في الطَور الأب B2، والطَور المعيَّني والطَور المرتنزيتي لأغشية خليطة النيكل ـ تيتانيوم بقياس انعراج الأشعّة السينية، وجرى تحديد ثوابت الطَور الأب والطَور المتوازي المستطيلات والطَور المرتنزيتي في حالة غشاء الخليطة الثلاثية نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس التي تساوي فيها نسبة النحاس 9.5 في المئة ذ.

**5 ـ** أبدت حلقة تباطؤ التحوُّل المقترنة بالانتقال في ما بين الطَور الأب والطَور المتوازي المستطيلات اعتماداً قوياً على نسبة النحاس، وهي تنخفض من 27 إلى 11 كلفن مع ازدياد نسبة النحاس من 0 حتى 9.5 في المئة ذ.

وقام مركز التقانة الصناعية في مقاطعة توياما باليابان، بالتعاون مع شركات .Hokuriku Electric Industrial Co., Ltd، وTakagi Seiko Co., Ltd. و Tanaka Engineering Co., Ltd.[168] بتطوير غشاء ختشي يغيّر شكله تدريجياً استجابةً للتغيّرات في درجة حرارة الجو المحيط.

تحتوي الختشيات العادية على مقادير ثابتة من النيكل والتيتانيوم، وهذا ما يجعلها تتذكَّر شكلها فجأة حين وصولها إلى درجة حرارة معيّنة. أما الغشاء الجديد فيتصف بوظيفة متدرّجة، مغيِّراً تركيبه وشكله تدريجياً مع تغيّرات درجة الحرارة.

ركَّز فريق البحث اهتمامه في حقيقة أن درجة حرارة التشوُّه تتغير اعتماداً على نسبتي النيكل والتيتانيوم. في أثناء إنتاج غشاء خلائطي، جرى تغيير القوة المطبقة على الركيزة باستمرار، وخُفِّضت درجة حرارة المعالجة الحرارية، التي تكون عادةً أعلى من 1000 مْ، حتى 700 مْ. والنتيجة هي غشاء يتغيَّر تركيبه في اتجاه سماكته تدريجياً.

في هذا الغشاء الخلائطي الجديد، يساوي الفرق بين درجة الحرارة التي يبدأ عندها التشوُّه، ودرجة الحرارة التي يكتمل عندها، 40 مْ، أي نحو ضعف الفرق في حالة الغشاء المتجانس التركيب. ويمكن التحكُّم بشكل هذا الغشاء الجديد أيضاً بضبط تيار كهربائي يمر عبره ويُسخِّنه.

ويُخطط الفريق الآن لاستخدام قابلية الغشاء للتغيُّر باستمرار في تصنيع وتسويق تجهيزات فائقة الدقة من قبيل تجهيزات معالجة التجلُّط الطبية، والملاقط والصمّامات الميكرويّة، ومُحِسَّات الحرارة الضئيلة.

## الروبوتيات والتجهيزات الميكرويّة المقاس

عندما نتحدث عن التجهيزات الميكرويّة نقصد ميْز حركة وأبعاداً للمكوِّنات أصغر من ذاك الذي يمكن تحقيقه في الورشة. وفي التمثيل القائم على ميْز الحركة مقابل حجم القطعة، توضع الروبوتيات الميكرويّة عادةً في منطقة معرَّفة بقيم للميْز تمتد من 10 ميكرون حتى 1 نم، وقيم للأبعاد تمتد من 10 ملم و1 ميكرون. يُشار إلى أن هذه القيم تمثل توجُّهاً، لا تعريفاً.

وتسمّى التجهيزات الميكرويّة، التي تتكامل فيها وظائف أخرى من قبيل التحكّم بالدارات المتكاملة، عادة بالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة (Micro Electro Mechanical Systems) (MEMS). طبعاً، ثمة صلة عادة بين النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة والتقانات والمعالَجات القائمة على السليكون، لكن وفقاً للتعريف، يجب ألا تقتصر النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة على تلك المقترنة بتلك التقانات. لذا، يُستخدم المصطلح الذكي «التجهيزات الميكرويّة» للتعبير عن الآليات الصغيرة، سواء كانت متكاملة أم لا.

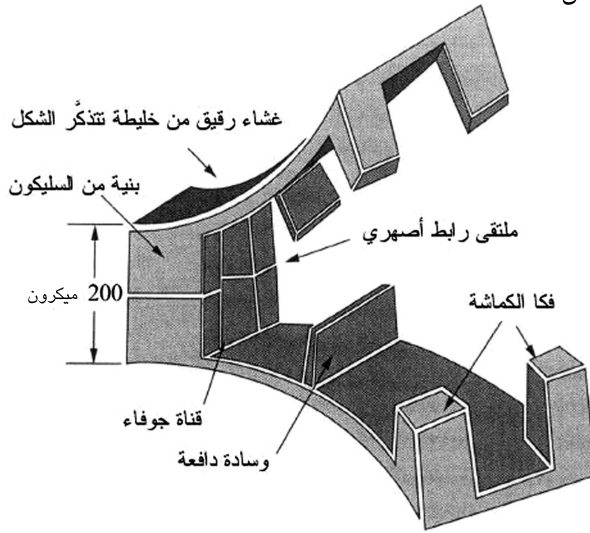
طوَّرت الشركتان Technology Innovations LLC, West Henrietta, NY وInnovation on Demand, Inc., Los Gatos, CA مفهوماً لروبوت ميكروي لاسلكي يمكن تشغيله بحزم مبأَّرة من الطاقة. تُصنع هذه الروبوتات الميكرويّة، التي تُعرف أيضاً بالمفعِّلات الميكرويّة، من ختشيات نيكل ـ تيتانيوم تُنتجها الشركة TiNiAlloy

Co., San Leandro, CA. وقد صُنعت بترذيذ الختشية على ركائز يصل عرضها إلى 2 ميكرون، وطولها إلى 10 ميكرون.

يحتوي الروبوت المكروي على مقبض لأجسام مقاساتها من رتبة 100 نم، وهو مزوَّد بساقين ليتحرك عليهما. وتوجد فيه نقاط أرجوانية تسخَّن بالحزمة الإلكترونية، فتنقل الحرارة إلى «العضلات» الختشية في الساقين والمقبض بغية توليد الحركة المبرمجة. وتستطيع المفعِّلات، بتغيير شكلها، التقاط أجسام نانوية المقاس أو حتى الحركة. يمكن استخدام هذه التقانة في بناء تجهيزات طبية من قبيل الصمّامات والشبكات الأنبوبية وأدوات الجراحة الميكرويّة، إضافة إلى قوالب التصنيع الصغيرة.

وفي مجال الروبوتيات الميكرويّة، طوَّر لي (Lee) وزملاؤه[169] واحدة من أصغر الكمّاشات الميكرويّة الختشية، وكانت أبعاد تلك الكمَّاشة 0.38 × 0.2 × 1 مم$^3$. أما مبدأ التصميم فهو نوع من البنية ذات الشكل الشبيه بالأحياء من مواد ختشية وسليكون. تعمل طبقة السليكون كنابض معاكس. وتتكوَّن الآلية من فكَّين متماثلين يفعَّلان بخليطة نيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس. ويُوضَّع غشاءان رقيقان على كل من جانبي الفكين الخارجيين. ويُصنع الفكَّان من السليكون، ويُشكَّلان بالقص الدقيق والتشغيل المكروي للسليكون. ويلتصق الجزء العلوي من الكماشة بالجزء السفلي بواسطة لاصق انتقائي أصهري. وتعمل دعامتا السليكون بوصفهما نابضين متعاكسين. وحين تسخين غشائَيْ النيكل ـ تيتانيوم ـ نحاس، يحنيان الدعامتين السليكونيتين البارزتين، وحينما يبرَّدان تعود الدعامتان إلى استقامتهما، وتمطَّان غشائي تذكُّر الشكل. وثمة وسادة دافعة صمِّمت للمساعدة على تحرير الجسم المقبوض عليه بدفعه إلى الأمام حين فتح الكماشة. وتُستخدم وسادة تسخين، وهي مقاومة كهربائية على

شكل غشاء رقيق مصنوع بطرائق تصنيع الدارات المتكاملة، لتسخين الكماشة الميكرويّة. لقد بيَّنت النتائج التجريبية إمكان تحقيق فتحة للكماشة تصل إلى 110 نم عند التفعيل الكامل، مع قوة قبض قدِّرت بـ 13 ميلي نيوتن. أما استجابة الكماشة الزمنية فكانت نحو 0.5 ثانية (انظر الشكل 4 ـ 15).




**الشكل 4 ـ 15: الكماشة الميكروية التي طوَّرها مخبر لورانس ليفرمور القومي**[169].

وباستخدام سيرورات السليكون، طوَّر بوشايلوت (Buchaillot) وزملاؤه [118] منصَّة مستوية ثنائية الأبعاد من أغشية النيكل ـ تيتانيوم. تتكوَّن هذه المنصَّة المستوية من أربعة نوابض صفيحية تعمل في مستوي الركيزة نفسه. وكل مفعِّل يحتوي على نابضين صفيحيين متوازيين يُمطان في البداية في أثناء التركيب لتحريض إعادة توجيه لطور المرتنزيتي.

إن هذه المفعِّلات موصولة ميكانيكياً معاً، وهي مصمّمة لتجنّب

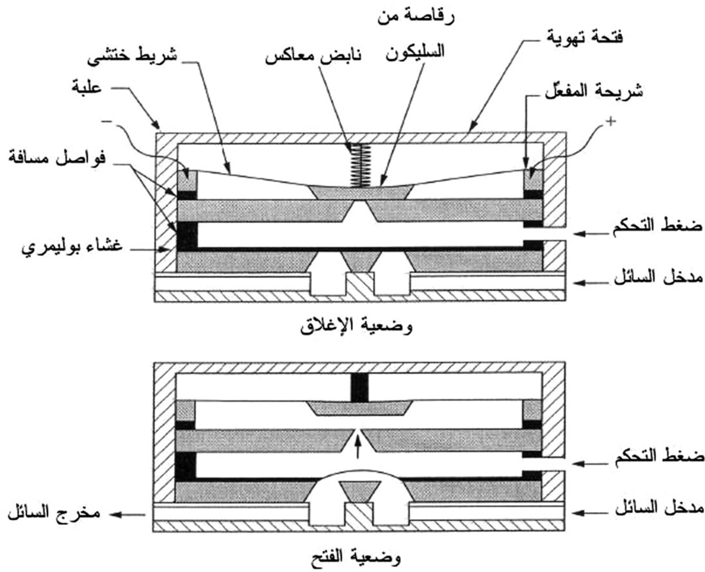
أي تقارن بين درجات الحرية. لذا فإن مبدأ التفعيل الأساسي هو التصميم المناوئ، حيث يقوم كل مفعِّل بتشويه نظيره. لا تزيد مساحة التجهيزة كلها عن بضعة ميليمترات مربعة.

وثمة الكثير من المفعِّلات القابلة للانعكاس المقترحة في المنشورات[170]. ومن هذه التصاميم، ذراع روبوتية ميليمترية المقاس اقترحها كوريباياشي (Kuribayashi) وزملاؤه[171] في عام 1993. وقد استُخدم فيها مفعول تعدّد المفعِّلات لتحقيق مفعول قابل للعكس في عارضة من خليطة نيكل ـ تيتانيوم. فقد ضُمَّت ثلاث من هذه الدعامات معاً لتحقيق روبوت مكروي مشابه لروبوت ذراع التجميع SCARA، لكن بثلاث درجات حرية. وفي ما بعد، طوَّر كوريباياشي وفوجي دعامة ميكرويّة مصنوعة من غشاء ختشي رقيق أُجهد سلفاً بطبقة من البولي إيميد [1] التي تحقّق حركة عكسية حين تبريدها.

**التطبيقات السوائلية (Fluidic Applications)**: الشركتان الرائدتان في حقل التطبيقات السائلية هما بوش (Bush) وجونسون[173] (Johnson). ففي عام 1989، حصلت الشركتان على براءة اختراع لصمّام ميكروي يُستخدم فيه غشاء ختشي رقيق، سبق أن عولج بتقانات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. يتألف الصمّام من كتلة سليكون ذات فوهة، وكتلة مفعِّل تتضمّن رقّاصة يتحكم بها شريط ختشي مكروي من النيكل ـ تيتانيوم، ونابض معاكس. ويسخِّن تيار كهربائي المفعِّل (شريط النيكل ـ تيتانيوم الميكروي). حينما لا يمر تيار كهربائي في المفعِّل، يدفع النابض المعاكس الرقاصة نحو الفوهة، فيغلق الصمّام. وحين تمرير تيار كهربائي، يتقلص المفعِّل فيرفع الرقاصة عن الفوهة فاتحاً الصمّام. إن مساحة التجهيزة بكاملها أقل من 0.5 سم$^2$. أما مسافة إزاحة الرقاصة فتزيد على 100 ميكرون. وكتقريب خشن، يتناسب التدفق عبر الصمّام مع التيار المار عبر

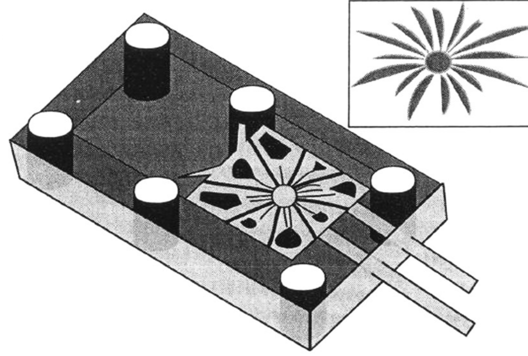
المفعِّل. ويمكن استخدام التيار مع تغذية راجعة مناسبة للتحكم بالتدفق[173] (انظر الشكل 4 ـ 16).

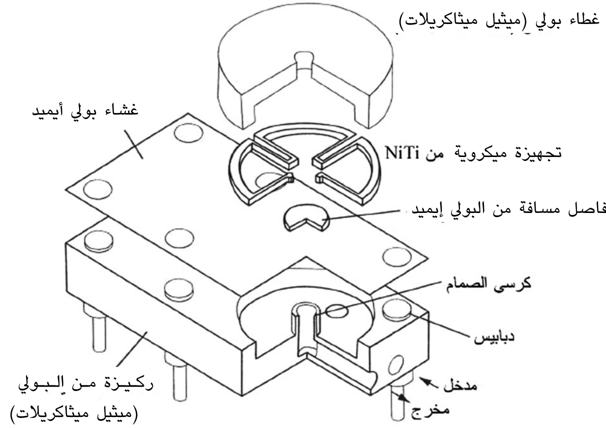
وفي تنفيذ آخر، صمّم كول (Kohl) وزملاؤه[174] صمّامات ميكرويّة بمكاملة مفعِّلات ختشية منحنية مصنوعة من صفائح نيكل ـ تيتانيوم مقصوصة ليزرياً وملفوفة على البارد (انظر الشكل 4 ـ 17).




**الشكل 4 ـ 16: الصمام الميكروي الذي طوَّره جونسون وزملاؤه[174][173].**

يتألف الصمّام من علبة من البولي (ميثيل ميثاكريلات) PMMA مع مقر للصمّام متكامل معها، وغشاء من البولي إيميد، وفواصل مسافة من البولي إيميد، ومفعِّل ختشي مكروي. ويُستخدم المفعِّل المكروي للتحكُّم بانحراف الغشاء الذي يَفتح أو يُغلق فتحة في مقر الصمّام. وقد صُنع المفعِّل من عناصر داعمة مستمثلة للإجهاد ذات اتجاه تفعيل متعامد مع سطح الركيزة.






**الشكل 4 ـ 17: الصمام الميكروي الذي طُوِّر لدى الشركة Forshung Zentrum في ألمانيا[174].**

## تطبيقات مفعِّلات متخصِّصة[180][175]

تقوم الشركة بوينغ بتطوير واختبار تحسين لأداء الطائرة المروحية V-22، وذلك بإعادة تحديد توزُّع توجيه شفرات المروحة السكوني وتمكين الشفرات الدوارة من تغيير توجيهها على نحو متناوب في أثناء التحليق باستخدام مفعِّلات ختشية ضمن الشفرات.

طورت وكالة الفضاء الأميركية[176] وابتكرت طريقة محسَّنة لتصميم وتصنيع بُنى من مادة مركَّبة صفيحية (حاضنة/ ألياف) تتضمّن مفعِّلات ختشية. تتصف الإنشاءات المصنوعة بهذه الطريقة بخواص قابلة لإعادة الإنتاج وتوقّعها، ويمكن أتمتة سيرورات تصنيعها فعلياً.

لقد استُقصيت هذه البُنى التي تسمّى مواد مركَّبة ختشية هجينة، بسبب إمكانها تحقيق متطلبات التحكُّم بالأشكال والاستجابات من حيث المرونة الحرارية الخاصة بها، أو بالبُنى الأخرى التي يمكن أن تُضمَّن فيها، بالتحكُّم بالضجيج والاهتزازات. يتضمَّن الكثير من الأعمال السابقة في هذا المجال استخدام أسلاك ختشية موضوعة ضمن حاضنات أو أكمام في البُنى المحتوية عليها.

من مثالب استخدام الأسلاك الختشية كمفعِّلات مضمَّنة في بُنى أخرى (**1**) إجراءات التصنيع المعقّدة بسبب عدد المفعِّلات الكبير نسبياً المطلوب عادة، و(**2**) الحساسية لعيوب ملتقى المفعِّل والحاضنة لأن الفراغات فيه يمكن أن تكون كبيرة مقارنة بمقاسات الأسلاك، و(**3**) معدل تلف المفعِّلات العالي في أثناء شيِّ المواد الحاضنة بسبب الحساسية لتركيز الإجهادات عند التشوّهات الميكانيكية، و(**4**) صعوبة الحصول على النسبة الكلية المرغوب فيها من الأسلاك الختشية عند محاولة استمثال تكامل الأسلاك بوضعها في طبقات معيّنة فقط.

في الطريقة الحالية، تُستخدم الأشرطة الختشية بدلاً من الأسلاك. وهذا يقلِّل عدد المفعِّلات التي يجب احتواؤها، ومن ثَمَّ يمكِّن من تبسيط عمليات التصنيع وتحقيق تحكُّم أفضل بمواضع المفعِّلات وبالحيِّز الذي تحتله.

في أحد التطبيقات الشائعة لهذه الطريقة، يمكن صنع بنية واحدة أو أكثر، يتألف كل منها من صفيحة إيبوكسي/ حاضنة/ ألياف تحتوي في داخلها على شريط ختشي واحد أو أكثر. في البداية،

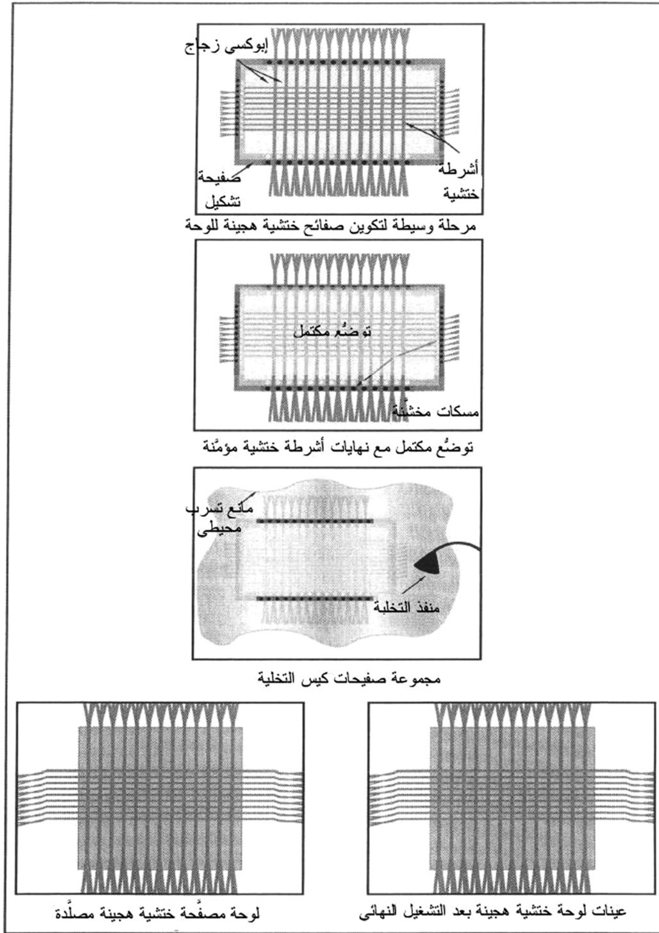
تزال الأشرطة التي تأتي من المصنع ملفوفة على بكرات، من البكرات، وتعالج لتخليصها من الانفعال الناجم عن لفها على البكرة. وباستخدام آلة اختبار شدّ تعمل في نمط قياس الاستطالة، يُمطّ الشريط بمقدار الانفعال الأولي المطلوب في تصميم البُنية. وبغية تقليص مدة العمل، يمكن مـــطُّ شرائط متعدّدة لها أطوال متماثلة، تفصل بينها فواصل مسافة، وتُمسك بها مقابض مصمّمة خصيصاً لهذا الغرض، آنياً بواسطة الآلة نفسها.

يبيّن الشكل 4 ـ 18 مراحل عدة من تصنيع بُنى على شكل لوحات بعد إطالة المفعِّلات الختشية. تُصنع بُنى المواد الختشية الهجينة بوضع قطع من الشريط الختشي في مواضعها في أثناء تشكيل الصفيحة. وبناءً على تصميم البنية موضوع التطبيق، إما أن توضع الأشرطة الختشية بين الصفائح، أو تُزال أجزاء دقيقة من الصفيحة وتُحشر في مكانها الأشرطة الختشية. وبعد استكمال عملية التوضيع، تقيَّد نهايات الأشرطة الختشية الحرة بملاقط ميكانيكية للحفاظ على الاستطالة الأولية في أثناء الشيِّ عند درجة حرارة مرتفعة. ثم توضع المجموعة كلها ضمن كيس مُفرَّغ من الهواء، وتُعرَّض للشيِّ في مِحمٍّ. وبعد الشيِّ، تُحرَّر نهايات الأشرطة الختشية من الملاقط، وتُشغل البنية الختشية الهجينة لتأخذ أبعادها النهائية.

ولدى وكالة الفضاء الأميركية[177] أيضاً، لُفَّ شريط ختشي على أسطوانة بطول مناسب لتشكيل مفعِّل ختشي أسطواني انسحابي/دوار.

يولِّد هذا المفعِّل الصغير حركة دورانية أو انسحابية، بعزم أو قوة كبيرين. وقد صُمِّم النموذج الأصلي منه لسحب وتد يمنع، قبل سحبه، رجوع الأنف المتوسِّع المقترح لآلية الهبوط في المكّوك الفضائي. ثمة حاجة إلى النموذج الأصلي أيضاً بسبب إمكان استيعابه

في حيّز محدود جداً بحجم مجموعة آلية الهبوط. ويمكن تكييف هذا التصميم الأساسي لاستخدامه في تطبيقات أخرى تحتاج إلى مفعِّلات قوية متراصة لها أشكال هندسية مشابهة.




**الشكل 4 ـ 18: أشرطة ختشية مُضمَّنة في لوحة صفائح من الإيبوكسي وألياف الزجاج. جرى تشغيل اللوحة للحصول على عينات حزمة ختشية هجينة لاختبارها(176).**

يتألَّف الجزء النشط من هذا المفعِّل من شريط ختشي من النيكل ـ تيتانيوم. تُعرَّض قطعة مصنوعة من هذه الخليطة إلى تشويه شديد يُعطيها شكلاً يمكن تذكُّره (في هذه الحالة يصبح الشريط أقصر) حين ارتفاع درجة حرارته إلى ما فوق درجة الانتقال، مسبِّبة تحوُّلاً في بنيته المعدنية من الطَور المرتنزيتي إلى الطَور الأوستنيتي. وتستعيد القطعة شكلها السابق (يصبح الشريط أطول) عندما تنخفض درجة حرارتها إلى ما دون درجة حرارة التحوُّل (ثمة حلقة تباطؤ في التحوُّل). في هذه الحالة، تكون درجة حرارة التحوُّل أعلى من درجة حرارة الغرفة قليلاً.

للحصول على طول شريط كافٍ لتحقيق حركة كافية، يُلَفّ الشريط الختشي ثلاث مرات حول أسطوانة. ويُثبّت أحد طرفي الشريط بالأسطوانة، ويُثبّت الآخر بجسم لا يتحرك بالنسبة إلى محور الأسطوانة. ويُسخَّن الشريط بتمرير تيار كهربائي فيه. وعندما ترتفع درجة حرارته إلى ما فوق درجة حرارة الانتقال الطَوري الأولى، يولِّد التقلُّص الناجم عن تذكُّر الشكل عزماً يؤدّي إلى دوران الأسطوانة. في التطبيق الأصلي، تُحوَّل حركة الأسطوانة الدورانية إلى حركة انسحابية باستخدام أذرع متمفصلة مع الأسطوانة تتدحرج على دواليب. في التطبيقات الأخرى، يمكن أن تكون حركة الأسطوانة الدورانية هي المطلوبة.

كانت الصعوبة الرئيسة التي اعترضت الاختبارات الأولية لهذا المفعِّل هي أن الاحتكاك الانزلاقي الناجم عن لف الشريط ثلاث مرات حول الأسطوانة كان كبيراً إلى درجة أفسدت التفعيل. وقد خُفِّض الاحتكاك إلى مستوى مقبول بوضع الشريط على بكرة دوارة غير ناقلة سمحت له بالحركة حول الأسطوانة بدلاً من الانزلاق.

ثمة تقارير عن تطوير شركة Jergens Inc., Cleveland, OH

لمقامط ميكرويّة طراز (Electralock) تُغذّى بالطاقة الكهربائية بواسطة تقانة «المعدن المبرمج». تُصنع هذه المقامط من ختشية تسمح للمفعِّل المعدني بالتوسُّع والتقلُّص في أثناء التحوُّل الطَوري البلّوري.

بالاستعاضة عن الأجهزة الهيدروليكية المستخدمة في القمط بمقامط الطاقة، يُصبح إعداد وصيانة المقمط أسهل كثيراً. عندما يريد المشغِّلون تحريك مجموعة التثبيت بالقمط، ما عليهم إلا سحب قابس الكهرباء من المقبس.

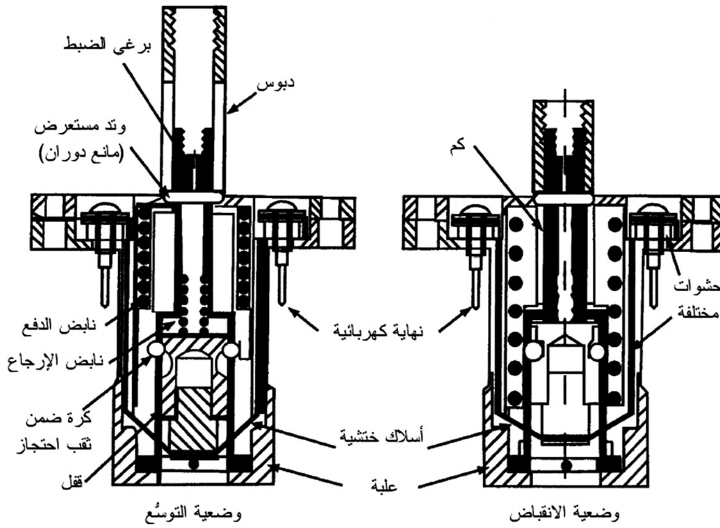
تقوم هذه التقانة على التحوُّلات الطَورية لخليطة النيكل ـ تيتانيوم حين انتقالها من الطَور المرتنزيتي إلى الطَور الأوستنيتي. وقد نُقِّح هذا الانتقال لتكوين مفعِّلات قابلة للتدرُّب، وقادرة على تكرار سلوكها الذي يمكن توقّعه. يعمل المقمط ضمن المفعِّل عندما تسخَّن الخليطة كهربائياً لتجعل المادة الختشية تتمدّد وتحرِّر ضغط القمط البالغ 340 كغ.

يُقال إن قابلية المقمط للحركة تجعله مثالياً لتطبيقات التثبيت النقالة. ويبقى المقمط في حالة القمط الآمن ما دامت التغذية الكهربائية مقطوعة عنه. يضاف إلى ذلك أن بنيته المقاومة للبلل بالماء، وإمكان تغذيته بتيار متناوب 110 فولت، يجعلان استخدامه في الورشة عالي المرونة.

يبيّن الشكل 4 ـ 19 واحدة من الآليات الخاصة بالنازعات الدبوسية (Pin Puller) التي تستغل خصائص استعادة الشكل في الختشيات. وعلى غرار بعض الآليات المفعَّلة بالختشيات المذكورة سابقاً[178]، فإن النازعات الدبوسية هذه مناسبة للاستخدام عوضاً عن النازعات القائمة على المفرقعات النارية، ويمكن تشغيلها بالتحكّم من بُعد لتحرير باب، أو كشف، أشياء مخفية، على سبيل المثال.

وخلافاً للنازعات المفعَّلة بالمفرقعات، فإن هذه النازعات قابلة للاستخدام المتكرر.

يعمل المكوِّن الختشي في النازعة الدبوسية هذه مفعِّلاً لتحرير الطاقة الكامنة المخزونة في النابض الدافع. يدفع هذا النابض آلية الشدّ باتجاه وضعية النزع (باتجاه الأسفل في الشكل). وفي الظروف العادية (ظروف عدم التفعيل)، يكون الدبوس في الوضعية المتوسِّعة (باتجاه الأعلى)، حيث يمنع القفل المثبّت بالكرة الانقباض.




**الشكل 4 ـ 19: في النازعة الدبوسية هذه المفعَّلة بمادة ختشية، يعمل السلك الختشي قادحاً لتحرير الطاقة الكامنة المخزونة في النابض الدافع[178].**

تُعرَّض المكوِّنة الختشية إلى تشويه واضح يؤدّي إلى شكل يمكن تذكُّره، وفق ما ورد في المرجع 177. والفارق هنا هو أن المكوِّنة الختشية هي سلك نيتينول. في هذا التطبيق، بغية ابتداء إرجاع الدبوس، يُمرَّر تيار كهربائي في السلك الذي يسخن حتى ما

فوق درجة حرارة انتقاله الطَوري، فيتقلَّص إلى طوله «المتَذكَّر» (غير الممطوط). ويسحب السلك المتقلِّص القفل إلى الأعلى ليعاكس ضغط نابض الإرجاع إلى الحالة الابتدائية. وتكون النتيجة تحرير الكرات من الثقوب الحاجزة لها، وبذلك لا تقف عائقاً في وجه رجوع الدبوس.

بعدئذٍ، يمكن إعادة الآلية إلى وضعية الجهوزية ثانية بسحب الدبوس إلى الخارج. وما دام السلك الختشي بارداً بالقدر الكافي لاستعادة شكله الممطوط، سوف تبقى الآلية في الوضعية الابتدائية لأن النابض يدفع القفل إلى أدنى وضعية له، حيث تُجبر الكرات على النتوء من ثقوبها.

استقصى بيوا (Biwa) وزملاؤه[179]، نظرياً وتجريبياً، السلوك الحركي لمفعِّلات ختشيات النيكل ـ تيتانيوم ذات النوابض المعاكسة. ودرسوا بعض الخصائص الأساسية للمفعِّلات الختشية بصياغة نموذج تحليل لمفعِّل ذي نابض معاكس يُشغَّل كهربائياً، اعتماداً على المعادلات الحرارية الميكانيكية التأسيسية. وتبيَّن لهم أن نموذجهم واعد من حيث وصف سلوك المفعِّل المُشاهَد تجريبياً بدلالة اعتماده على جساءة النابض المعاكس، والجهد الكهربائي المطبَّق، ومدة دورة العمل. وبتوفُّر طريقة لتحديد موسطات النموذج المختلفة التي تحتاج إلى مزيد من التمحيص، فإنه يُتوقع أن يوفِّر النموذج المقترح وسيلة تحليلية لتصميم عدد من التجهيزات الختشية.

ونمذج لاغوداس (Lagoudas) وبهاتاشارايا[180] (Bhattacharyya) مفعِّلاً انسحابياً من طبقة ختشية رقيقة تُبرَّد كهروحرارياً، وذلك في خطوة أولى باتجاه تصميم مفعِّل ختشي شديد الانفعال، وكبير القوة، وعالي التردّد. أُخضِعت المادة الختشية إلى تحوُّلات طورية دورية بين الطَورين المرتنزيتي والأوستنيتي

بالتسخين والتبريد المتناوبين اللذين تحقَّقا باستخدام مفعول بلتييه (Peltier) الموجود في زوج، موجب وسالب، من أنصاف النواقل. ودُرِس مفعول حمل التفعيل المتغير والحمل الثابت المطبقان بوصفهما شرطين حدِّيْن للمفعِّل. وكانت الموسّطات الرئيسة التي حصل الاهتمام بها في هذا النموذج هي الاستجابة التردّدية وتأثير الحمل المتغير. وقورن أداء المفعِّل بأداء المفعِّلات المتوافرة تجارياً اعتماداً على كفاءات تحويل الطاقة وطاقة الخرج لواحدة الحجم من المادة الفاعلة. ودلَّت نتائج التحليل على أن الطبقات الختشية الرقيقة التي تخضع لتحوُّل طوري جزئي تستطيع تحقيق تردّدات تساوي 30 هرتز تقريباً عند ذروة إجهاد تساوي 145 ميغا باسكال.

ودرس أولاَّكو[181] (Ullako) الختشيات المتحكَّم بها مغنطيسياً بوصفها فئة جديدة من مواد المفعِّلات. إن المواد التي تُعطي استطالات كبيرة ضمن ظروف تحكُّم دقيق وسريع تمتلك إمكانات كبيرة في الهندسة الميكانيكية. فالمفعِّلات المصنوعة من هذه المواد يمكن أن تحل محل السواقات الهيدروليكية والغازية والكهربائية المغنطيسية في كثير من التطبيقات. تُبدي المواد الكهروضغيطة والمتغيرة الشكل مغنطيسياً (Magnetostrictive) استجابة سريعة، إلا أن استطالتها صغيرة. أما الختشيات، فاستطالتها كبيرة، إلا أن التحكّم بها بطيء بسبب الاستجابة الحرارية الميكانيكية البطيئة. لذا اقترح أولاَّكو لاحقاً التحكّم المغنطيسي بمفعول تذكُّر الشكل بوصفه مبدأ لنوع جديد من مواد المفعِّلات. يمكن لهذه المواد أن تعطي انفعالات بنسب مئوية مختلفة، إضافة إلى سهولة ودقة التحكّم فيها. ويعتمد تفعيل هذه المواد على إعادة توجيه البنية التوأمية للمرتنزيت، أو على حركة الملتقيات المرتنزيتية ـ الأوستنيتية بتطبيق حقل مغنطيسي. ويَعرِض أولاَّكو في المراجع 182 ـ 186 الحركة المحرِّضة مغنطيسياً

للملتقيات الأوستنيتية ـ المرتنزيتية في خليطة حديد ـ 33.5 في المئة نيكل. وأدرك أولاًّكو وهاندلي (Handley) مزايا الخلائط القائمة على النيكل التي تغيّر أشكالها استجابة للحقل المغنطيسي[187]. والخليطة $Ni_2MnGa$ هي ختشية معروفة بعودتها إلى شكلها الأصلي، بعد تشوُّهها، استجابةً لزيادة درجة الحرارة. وقد تبيَّن أخيراً أنها تستجيب للحقول المغنطيسية بقدر استجابتها للتغيّرات الحرارية. ويمكن للتحكّم بمفعول تذكُّر الشكل مغنطيسياً أن يمثّل قفزة مهمة إلى الأمام في تطوير ما يسمّى المواد الذكية. هذا لأن الاستجابة المغنطيسية أسرع وأعلى كفاءة من الاستجابة المحرَّضة حرارياً.

أدرك الباحثون الإمكانات الكامنة في مفعول تذكُّر الشكل في الخليطة $Ni_2MnGa$ أول مرة قبل نحو عقدين من السنين. وبعد سنين عدة، لاحظت مجموعة لدى معهد ماساشوستس للتقانة MIT، يقودها كل من هاندلي وأولاًّكو، انفعالاً شديداً تحرَّض بالحقل المغنطيسي. واستمر العمل لدى MIT لتطوير مواد مغنطيسية تتذكَّر الشكل لاستخدامها في المحوالات الصوتية تحت المائية (Sonar Transducers) ونظم تخميد الاهتزازات لمصلحة البحرية الأميركية.

استطاع فريق العمل حتى الآن رفع مقدار الانفعال حتى 6 في المئة عند درجة حرارة الغرفة من نحو 0.2 في المئة عند 8− مْ. وهذا ينطوي على مزايا مهمة لتطبيقات الخليطة التجارية في المضخات والصمّامات.

ووجد أعضاء فريق العمل أن تغيير التركيب قليلاً (50 في المئة نيكل، 29 في المئة منغنيز، 21 في المئة غاليوم) يمكن أن يؤدّي إلى نتائج أفضل عند درجة حرارة الغرفة. وبيَّنوا أنه بتطبيق إجهاد سكوني على الخليطة، فإنه يمكن إعادتها إلى حالتها الابتدائية، وتفعيلها مرات عديدة متكررة على نحو شبه سكوني.

وأتاحت كشوفات مستجدة في ما بعد لمجموعة MIT عرض انفعالات بتردّدات تصل إلى 500 هرتز، ومكَّنتهم من توصيف مقدرة الخليطة على العمل (أي الانفعال بالحمل). لقد أبدت هذه الخليطة انفعالاً يساوي 30 ضعفاً عند درجة حرارة الغرفة من ذاك الذي تُبديه مواد أخرى يُتحكَّم فيها مغنطيسياً.

يختلف مفعول تذكُّر الشكل مغنطيسياً عن المفعول المحرَّض حرارياً، أو الناجم عن المرونة الحرارية. ففي حين أن المفعول المحرَّض حرارياً أو الناجم عن المرونة الحرارية يحتاج إلى انتقال من الطَور المرتنزيتي إلى الطَور الأوستنيتي، فإن المفعول المغنطيسي يحصل كلّياً في الطَور المرتنزيتي، حيث يتغيّر الشكل عندما تنمو البُنى التوأمية، التي تفضل اتجاه الحقل المغنطيسي، على حساب البُنى التوأمية الأخرى في المادة.

تأمل الشركات في الاستفادة من هذه السمة الفريدة من خلال تطوير تطبيقات تحوِّل طاقة الحقل المغنطيسي إلى حركة ميكانيكية. ومن تلك التطبيقات تجهيزات إلكترونية ميكانيكية بسيطة يمكن أن تحل محل الآلات المعقّدة في كل مجال، من الإلكترونيات المنزلية حتى السيارات.

ثمة حالياً مُحِسَّات من مواد تتذكَّر الشكل في قيد الإنتاج، إضافة إلى مفعِّلات قادرة على الاستطالة بمقدار يصل إلى 5 ملم وقوة انفعال تصل إلى 2000 نيوتن.

## التوجهات والإمكانات المستقبلية

إن تطبيقات الختشيات مستمرة في اكتساب الترحيب بها في صناعات مختلفة في شتى أنحاء العالم. وقد قُدِّمت الختشيات إلى عدد متزايد من الطلاب الذين يدرسون الهندسة وعلم المعادن، وإلى

الجمهور من خلال العدد المتنامي من المنتجات الختشية المتوافرة للمستهلكين. صحيحٌ أن القيم الرقمية للخواص وتقنيات التصميم الخاصة بالختشيات ليست متوافرة كما يجب، أو مُمقْيَسة بالتفصيل كغيرها من المواد الأخرى، إلا أن التوجُّه الحالي يشير إلى تحرك مطَّرد نحو التوصيف الكامل للمواد الختشية. فالصناعة الطبية طلبت فعلاً مَقْيَسة إنتاج المواد واختبارها وسلوكها الميكانيكي. ومن المساعي في هذا الاتجاه قيام الجمعية الأميركية للاختبارات والمواد (American Society for Testing and Materials) (ASTM) بوضع مِقيَس لاستخدام النيكل ـ تيتانيوم في التجهيزات الطبية. فبضغط من ممثلي الإمداد في كل من الصناعة الطبية وصناعة المواد الختشية، تم وضع مِقيَس وإقراره. يمثِّل هذا المقيس الجديد مَعْلَماً مهماً في المساعي المستمرة لإزالة الغموض عن الختشيات ودعم استخدامها في التصميم والهندسة[193][188].

يؤدّي تصغير الأشياء إلى نُهُج جديدة، وتنطبق هذه القاعدة على التجهيزات الميكرويّة الختشية. لقد كانت ثمة فتوحات علمية وتقانية ناجحة في هذا الحقل، لكن ما زالت ثمة حاجة إلى مزيد من الفهم لسلوك التجهيزات الصغيرة في المستوى الميكروي. إنه لمن المعروف جيداً أن السلوك الميكانيكي لغشاء رقيق سماكته بضعة ميكرونات ليس كسلوك صفيحة سماكتها تساوي مئات عدة من الميكرونات. ووفقاً لقول نيكس[192] (Nix)، إن الأغشية الرقيقة، على سبيل المثال، أقوى كثيراً من نظيراتها السميكة. وقد يكون هذا ناجماً عن حجم الحُبيْبة الناعم الشائع في الأغشية الرقيقة، إلا أن الأغشية الرقيقة الأحادية البلّورة أيضاً أقوى كثيراً من المادة الجَسِيمة. وثمة كثير من القضايا الخاصة بالأغشية الختشية الرقيقة التي ما زالت من دون حل، أو التي لم تلقَ الدراسة الكافية:

• ما هي أقل سماكة يمكن لغشاء ختشي رقيق عامل أن يتخذها؟ بكلمات أخرى، ما هي حدود الأبعاد التي يبقى عندها مفعول تذكُّر الشكل قائماً؟

• إذا بُنيت بنية ميكرويّة المقاسات، فما مقدار نعومة الحركة فيها؟ هل سوف نرى فيها مفاعيل متقطعة غير مستمرة؟

• كيف يمكن تطبيق قانون التصغير على خواص التعب؟

يمكن توقع الكثير من التطوّرات إذا أُجريت عمليات التشكيل والعمليات الكيميائية في المستقبل في آن واحد. أكثر من هذا، يمكن أن تُأخذ في الحسبان درجات جديدة من التصغير إذا اتُبِعت النهُج الصعودية بدلاً من النُهج النزولية. وإحدى الأدوات الرئيسة في هذا المجال يمكن أن تكون ذلك التنوع المطَّرد في تقانة المسح المجهري بغية تعديل السطوح وابتداء إجراءات التصميم بسيرورات كهروكيميائية في المستوى النانوي[194][195].

## ملاحظات أخيرة بخصوص الإمكانات المستقبلية

يجب أن تكون ثمة إمكانات أخرى في مجالات المواد الجديدة والتصميم الهندسي الفراغي، إضافة إلى سلوك الختشيات الذكي المحسَّن. إلا أنه لا يمكن أن نذكر هنا إلا بعض الإمكانات المنتقاة من بين طيف واسع من المحاولات في حقول التطبيقات المختلفة. إن الجيل الحالي من نظم المواد الذكية، أكانت مفعِّلات أم مُحسَّات أم غيرها، خاضع للاعتبارات الهندسية، ويجب تحقيقه بالمواد المتاحة. ويبدو أن الخطوة العملية التالية هي ضم وظائف المفعِّلات والمُحسَّات مع نظام تحكم بتوضيع أغشية إلكتروسيراميكية على رقاقات الدارات المتكاملة السليكونية[196].

ما زال البحث في نظم التفعيل النانوية في مراحله الأولية[197]. ومن أولى الخطوات باتجاه تحقيق آلات جُزَيئية نانوية، على سبيل المثال، محاولة بناء محرّك حيوي، أي محرّك سوطي (Flagellar) من جراثيم خارج كائن حي، وهو أمر بسيط لأن المحرّك يتكون من بضعة جُزَيئات فقط، ولا يحتاج إلا إلى طاقة أصغرية كي يولِّد قوى كبيرة. وهو يعمل بسرعة وكفاءة عاليتين[198].

وثمة طلب متزايد في حقول من قبل الروبوتيات البشرية الشكل، والروبوتيات الميكرويّة لمفعِّلات تشابه العضلات ذات نسبة طاقة إلى وزن كبيرة، وتتصف بدرجة عالية من المطاوعة. إن العضلات هي مفعِّلات استثنائية لأنها ليست مولِّدات قوى محضة، ولا مولِّدات حركة محضة. فهي تتصرف كنوابض لها مُوَسّطات مرونة قابلة للضبط. يمكن لمثل هذا السلوك المركَّب أن يتحقَّق في المستقبل ببوليمرات البوليفينيليدين (Polyvinylidene) الكهروضغطية، أو ببوليمرات هلامية تخضع إلى تحويل كيميائي ميكانيكي وتولّد كثافات انفعالات وقوة كبيرة تضاهي تلك التي للعضلات. وقد أُثبت بالفعل أيضاً أن البوليمرات الناقلة تمتلك مقدرات على توليد قوة شديدة جدا[199]. وتقترب حالياً بعض المواد والنظم من واحدة أو اثنتين من الخواص المتقدمة شبه الذكية المرغوب فيها. من أمثلة ذلك البوليمرات المفعَّلة كهربائياً (Electroactive Polymers) التي تعمل كحُجُب أمن «نائمة» (محسَّات سعوية) لحماية البيانات المخزونة في الذواكر القابلة للبرمجة والمحو[200]، وبوليمرات الاستجابة الحرارية (PIPAAM) النشطة حيوياً التي يمكن فصلها عن المنتجات التفاعلية بزيادة طفيفة في درجة الحرارة، وهذا ما يجعل نظم التدوير المباشر للمواد ممكنة[201].

وعلى المدى البعيد، سوف يكون من الضروري اتباع أساليب

الطبيعة في التصميم، بحيث يجري التحكُّم بتركيب وتجميع نظم نشطة ذاتية الإصلاح ذات أشكال وظيفية، في جميع المستويات الجُزَيئية والنانوية والميكرويّة والجَسِيمة[202]. وفقاً لوجهة النظر هذه، ينبع تعلُّمنا من إخفاقنا الناجم عن عدم مقدرتنا على التعلُّم من البُنى الطبيعية في أثناء وجودها حية.

لقد حقَّق العلماء والمهندسون تقدماً في تطوير كثير من البُنى والنظم المتنوعة التي تستفيد من بعض إمكانات الطبيعة. فهم يستطيعون تغيير خواصها وأشكالها وألوانها. وإلى حد ما، أصبح من الممكن فعلاً تغيير مسارات التحميل المسؤولة عن التلف والإصلاح. إلا أن الرؤية البعيدة المدى يجب أن تفتح المشهد على نظم المواد الذكية التي هي من صنع الإنسان، والتي تصبح طبيعية على نحو متزايد وقادرة على أن تكون «حية» من حيث المقدرة على التعلُّم والنمو والبقاء والنضج على نحو بسيط وأنيق. على سبيل المثال، هناك لدى مكتب البحوث البحرية الأميركي تطبيقات من ذلك القبيل للسفن والغواصات والمركَبات والبُنى الأخرى.

يُستخدم في هذه المواد المركَّبة الهجينة صفائح ختشيات نيكل ـ تيتانيوم لاحتواء رغويات وقضبان فائقة المرونة تتذكَّر الشكل مملوءة بقطيرات زجاجية جوفاء لتحقيق مزيد من المرونة الفائقة.

## بوليمرات تذكُّر الشكل

أخيراً، ووفقاً لما ذُكر ونوقش باختصار سابقاً، تتصف بوليمرات تذكُّر الشكل بالمقدرة على خزن انفعالات كبيرة وعكسها بتطبيق دورة ميكانيكية حرارية محدّدة. والبروتوكول المعتاد لذلك هو إجراء تشويه أولي محدّد عند درجة حرارة مرتفعة، ثم تبريد المادة المشوهة وهي تحت الإجهاد حتى درجة حرارة منخفضة يثبت عندها

الشكل (خزن)، ثم تُسخَّن المادة لاستعادة شكلها (عكس الانفعال)[203].

من الأمور ذات الأهمية الخاصة لدى المجتمع الطبي تحريض تذكُّر الشكل عند درجة حرارة الجسم البشري، مع بوليمرات تحقّق مستويات جساءة وقوة استعادة للشكل متغيرة يمكن تفصيلها وفقاً للتطبيق. إن استعادة الشكل عند درجة حرارة الجسم تمكِّن من نشر قطع معقّدة الأشكال في بيئة الجسم من دون الحاجة إلى تسخينها موضعياً.

## مزايا بوليمرات تذكُّر الشكل

تتصف بوليمرات تذكُّر الشكل مقارنة بالمواد النشطة الأخرى، كالختشيات مثلاً، بمزايا عدة من قبيل انخفاض الكثافة والانفعال الشديد القابل للانعكاس، ومجال التفعيل الحراري القابل للتحكُّم فيه، والشيّ والقولبة المنخفضي التكلفة. وقد أدّت مقدرة هذه البوليمرات على خزن مقدار كبير من الانفعالات بغية نشرها في بيئات محدودة، إلى التطوّرات الأخيرة التي شهدتها التجهيزات الطبية القائمة على تلك البوليمرات.

ونظراً إلى أن الكثير من التطبيقات الطبية تتضمّن الحَنِي والإزاحات الكبيرة، وإلى أنه يمكن تحقيق تغيّر الشكل بالثني بمستويات انفعال متواضعة، فقد استقصى المرجع 203 الاستجابة الحرارية الميكانيكية في الحَنِي الثلاثي النقاط. في أثناء التبريد، لم يكن التقلّص مقيّداً جداً، وأمكن تخفيض الإجهاد اللازم للحفاظ على الشكل ثابتاً إلى الصفر مع تخفيض درجة الحرارة.

يمكن وصف دورة التشويه الأولي بالحَنِي الثلاثي النقاط واستعادة الشكل في بوليمرات تذكُّر الشكل بثلاث خطوات:

**الخطوة 1**: إجراء تشويه شديد الانفعال، يُسمّى التشويه الأولي.

**الخطوة 2**: هذه الخطوة هي إجراء تقييدي يبرَّد فيه بوليمر تذكُّر الشكل مع الاحتفاظ بالشكل ثابتاً.

**الخطوة 3**: في الخطوة الأخيرة، تُخضع بنية البوليمر إلى مستوى تقييد قبْلي التحديد، وتُسخَّن باتجاه درجة حرارة الانتقال الزجاجي. إن استرجاع الشكل غير المقيَّد ينطوي على غياب الإجهادات الخارجية وعلى انعكاس الانفعال انعكاساً حراً. أما الانعكاس المقيَّد فينطوي على تثبيت الانفعال الناجم عن التشويه الأولي وعلى توليد إجهاد استعادة للشكل متزايد تدريجياً.

ونظراً إلى أن دورة تذكُّر الشكل تمر عبر مجال التحوُّل الزجاجي، فإن السلوك الحراري الميكانيكي لبوليمرات تذكُّر الشكل يعتمد على كل من الزمن والحرارة. بكلمات أخرى، يمكن أن يكون لمعدل التسخين والتبريد تأثير كبير في إجهاد الاستعادة. أما القيمة العظمى لإجهاد الاستعادة فتتأثر بمعدل التبريد. وعند انفعال ثابت، يرتخي الإجهاد مع مرور الوقت.

وقد بيَّنت دراسات أخرى أنه عندما يكون التشويه الأولي عند درجة حرارة تزيد على درجة حرارة الانتقال الزجاجي، فإن تطوُّر إجهاد الاستعادة مع الحرارة يكون تدريجياً ويتشبَّع عمد إجهاد يساوي الإجهاد الحاصل عند التشويه الأولي.

من ناحية أخرى، عندما يكون التشويه الأولي عند درجة حرارة تقل عن درجة حرارة الانتقال الزجاجي، تُبدي استجابة استعادة الشكل تزايداً حاداً باتجاه قيمة قصوى مع تغيّر درجة الحرارة. ثم تُبدي تناقصاً باتجاه قيمة تشبع للإجهاد تتحدّد بإجهاد التشويه الأولي أو الانفعال عند درجات حرارة أعلى من درجة الانتقال الزجاجي.

وتخفِّض معدّلات التبريد العالية في أثناء التقييد درجة الحرارة اللازمة لتثبيت الشكل كلياً، إلا أنها تزيد من القيمة العليا للانفعال القابل للاسترجاع. أما معدّلات تغيّر الشكل في أثناء الاستعادة فتخفض درجة حرارة ابتداء الاسترجاع وتزيد من القيمة العظمى للإجهاد القابل للاستعادة.

---

## الهوامش


1. L. Schetky, «Mc., Shape-Memory Alloy Applications,» in: J. H. Westbrook and R. L. Fleischer, Eds., *Intermetallic Compounds* (New York: John Wiley & Sons, 1994), vol. 2: *Practice*, pp. 529-558.
2. C. M. Wayman, «Shape Memory Alloys,» *MRS Bulletin*, 18 (4), 49-56, 1993.
3. J. Haasters, G. v. Salis-Soho and C. Bensmann., «The Use of Ni- Ti as an Implant Material in Orthopedics,» in: T. W. Duerig [et al.], eds., *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* (Butterworth-Heinemann, 1990), pp. 426-444.
4. D. E. Hodgson, «Shape Memory Alloys,» *NiTi Smart Sheet*, http:/ /www.smainclSMAPaper.html.
5. Y. Bellouard, «Microrobotics and Microdevices Based on Shape Memory Alloys,» in: M. Schwartz, ed., *Encyclopedia of Smart Materials* (New York: J. Wiley and Sons, Inc., 2002), vol. 2, pp. 620-644.
6. *Development of High Temperature Two-Way Shape Memory Alloys*, Final Report, October 1991-March 1995, U.S. Army Res. Office, Res. Triangle Park, NC, October 17, 1995, p. 27.
7. C. M. Wayman and T. W. Duerig, «An Introduction to Martensite and Shape Memory,» in: T. W. Duerig [et al.], eds., *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* (Butterworth-Heinemann, 1990), pp. 452-469.
8. L. Delaney, [et al.], «Nonferrous Martensites, Classification, Crystal Structure, Morphology, Microstructure, Proceedings Int. Conf Solid-Solid Phase Transformation,» *Met. Society of*

*AIME*, pp. 1429-1453, 1992.
9. T. Maki, and T. Tamura, «Shape Memory Effect in Ferrous Alloys,» *Proc. ICOMAT-86,* Japanese Institute of Metals, 1986, pp. 963-970.
10. G. Wnag, «Weldability of Nitinol, «Edison Welding Institute publication, 1995, Available for Private Circulation Only.
11. T. Shinoda, T. Tsuchiya and H.Takahashi, «Friction Welding of Shape Memory Alloy,» *Welding International*, 6 (1), 20-25 (1992).
12. Q. Gu, J. Van Humbeeck and L. Delaey, «A Review of the Martensitic Transformation and Shape Memory Effect in Fe-Mn Si Alloys,» *Journal de Physique IV*, Col. C3, 4, C3-135-140 (1994).
13. T. Maki, «Ferrous Shape Memory Alloys,» in: K Otsuka and C M. Wayman (eds.), *Shape Memory Materials*, Chapter 5, Cambridge Univ. Press, 1998.
14. A. Sato [et al.], «Shape Memory Effect and Mechanical Behaviour of an Fe-30Mn-1Si Alloy Single Crystal,» *J. Physique*, 12 C4, 797-802 (1982).
15. A. Sato [et al.], «Shape Memory Effect in Transformation in Fe-30Mn-1Si Alloy Single Crystals,» *Acta Metall.*, 30, 1177-1183 (1982).
16. J. S. Robinson, and P. G. McCormick, «Shape Memory in an Fe-Mn-Si Alloy,» *Mat. Sci. Forum*, 56, 649-653 (1990).
17. A. Sato, «Shape Memory Effect and Physical Properties of Fe-Mn-Si Alloys,» *MRS Int'I. Mtg. on Adv. Mats.*, 9, 431-445 (1989).
18. M. Murakami [et al.], «Complete Shape Memory Effect in Polycrystalline Fe-Mn-Si Alloys,» *Proc. of Int. Conf on Mart. Transf (ICOMAT-86), Jap. Inst. of Metals* (1986), pp. 985-990.
19. S. Jonsson, «Review on Fe-Based Shape Memory Alloys, Swedish Inst. for Metals Research, Stockholm,» *NTIS Alert*, vol. 96, no. 4 (15 February 1996), p. 37.
20. G. Lecis, C. Lenardi, and A. Sabatini,» The Effect of Mn-Depleted Surface Layer on the Corrosion Resistance of Shape-Memory Fe-Mn-Si-Cr Alloys,» *Metallurgical and Materials Trans. A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 28(5), 1219-1222 (1997).

21. C Y. Chung, S. C. Chen and T. Y. Hsu, «Thermomechanical Training Behavior and Its Dynamic Mechanical Analysis in an Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy,» *Materials Characterization*, 37(4), 227-236 (1996).
22. A. A. H. Hamers and C M. Wayman, «Shape Memory Behavior in Fe-MnSi Alloys,» *Scripta Metallurgica Et Materialia*, 25(12),2723-2728 (1991).
23. D. Z. Liu, W. X. Liu and F. Y. Gong, «Engineering Application of Fe-Based Shape Memory Alloy on Connecting Pipe Line,» *Journ. of Physique III*, vol. 5 (ICOMAT-95, Proceedings), 1995, pp. 1241-1246.
24. Van Humbeeck, J. and Delaey, L., «A Comparative Review of the (Potential) Shape Memory Alloys,» in: E. Hornboger and N. Jost (eds.), *The Martensitic Transformation in Science and Technology* (Oberursel, Germany: DGM, Verlag, 1989), pp. 15-25.
25. J. Van Humbeeck, M. Chandrasekaran, and R. Stalmans, *Copper-Based Shape Memory Alloys and the Martensitic Transformation, Proc. ICOMAT-92* (Monterey, CA: Monterey Institute of Advanced Studies, 1993), pp. 1015-1025.
26. T. Tadaki, «Cu-Based Shape Memory Alloys,» in: K Otsuka and C. M. Wayman, eds., *Shape Memory Materials* (Cambridge University Press, 1998), Chapter 3.
27. M. Ahlers, «Martensite and Equilibrium Phases,» in: Cu-Zn and Cu-Zn-AI Alloys, Progress in Materials Science, Vol. 30, J. W. Christian, P. Haasen, and T. B. Massalski, eds., 1986, pp. 135-186.
28. S. K. Wu, and H. Ming, «Cu-Based Shape Memory Alloys,» in: T. Duerig et al, eds., *Engineering Aspects of Shape Memory* (Alloys, U.K: Butterworths Scientific, 1990), pp. 69-88.
29. Rapacioli, R and M. Chandrasekaran, *The Influence of Thermal Treatments on Martensitic Transformation in Cu-Zn-Al Alloys, Proc. Intl. Conf on Martensitic Transformations* (Cambridge, MA: MIT Press, 1979), pp. 596-601.
30. P. Rodriguez and G. Guenin, «Thermal and Thermomechanical Stability of Cu-Al-Ni Shape Memory Effect,» in: E. Hornbogen and N. Jost, eds., *The Martensitic Transformation in Science and Technology* (Oberursel, Germany: DGM, Verlag, 1989), pp. 149-156.

31. J. Van Humbeeck, L. Delaey and D. Roedolf,, Stabilisation of Isothermally Transformed 18R Cu-Al-Ni Martensite, Proc. Int. Conf on Mart. Transf (ICOMAT-1986), *Japan Institute of Metals* (1986), pp. 862-867.
32. R. Abeyaratne and J. K. Knowles, «On the Kinetics of an Austenite-Martensite Phase-Transformation Induced by Impact in a Cu-Al-Ni Shape Memory Alloy,» *Acta Materialia*, 45 (4), 1671-1683 (1997).
33. R. Kainuma, S. Takahashi and K. Ishida, «Thermoelastic Martensite and Shape-Memory Effect in Ductile Cu-Al-Mn Alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*, 27 (8), 2187-2195 (1996).
34. T. Xiao and G. P. Johari, «Mechanisms of Internal Friction in a Cu-Zn-Al Shape-Memory Alloy,» *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*, 26 (3), 721-724 (1995).
35. Z. G. Wei, H. Y. Peng, and W. H. Zou, «Aging Effects in a Cu-12Al-5Ni-2Mn1 Ti Shape Memory Alloy,» *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*, 28 (4), 955-967 (1997).
36. R. Romero, A. Somoza and M. A. Jurado, «Quenched-In Defects and Martensitic- Transformation in Cu-Al-Be Shape Memory Alloys,» *Acta Materialia*, 45 (5), 2101-2107 (1997).
37. R. Elst, J. Van Humbeeck and L. Delsaey, «Grain Refinement of Cu-Zn-Al and Cu-Al-Ti by Ti-Addition,» *Material Science & Technology*, 4, 644 -648, (1988).
38. R. Elst, J.Van Humbeeck and L. Delaey, «Evaluation of Grain Growth Criteria in Particle-Containing Materials,» *Acta Metall.*, 36, 1723-1729 (1988).
39. J. Van Humbeeck, «High-Temperature Shape Memory Alloys, Transactions,» *ASME*, 121, 98-101 (1999).
40. E. Hornbogen, «The Effect of Variables on Martensitic Transformation Temperatures,» *Acta Metall.*, 33, 595-601 (1985).
41. Z. Nishiyama, *Martensitic Transformation*, [New York: Academic Press, 1978].
42. D. N. Adnyana, «The Effect of Grain Size on the $M_s$-Temperature in a GrainRefined Copper-Based Shape Memory Al-

loy, Proc. Int. Conf on Mart. Transf,» *The Jap. Inst. of Met.*, 1986, pp. 774-779.
43. W. Jianxin, J. Bohong and T.Y.Hsu, «Influence of Grain Size and Ordering Degree of the Parent Phase on $M_s$ in a CuZnAl Alloy Containing Boron,» *Acta Metall.*, 36, 1521-1526 (1988).
44. R. Elst, J. Van Humbeeck and L. Delaey, «The Evolution of Martensitic Transformation Temperatures During Annealing of Supersaturated -Cu-ZnAl-Co Alloys, Proc. Int. Conf on Mart. Transf,» *The Jap. Inst. of Met.*, (1986), pp. 891-895.
45. N. J. Gu, H. F. Peng, and R. X.Wang, «Influence of Training Time and Temperature on Shape-Memory Effect in Cu-Zn-Al Alloys,» *Metallurgical and Materials Transactions A - Physical Metallurgy and Materials Science*, 27 (10), 3108-3111 (1996).
46. T. Saburi, «Ti-Ni Shape Memory Alloys,» in: K Otsuka and C. M. Wayman (eds.), *Shape Memory Materials* (Cambridge University Press, 1998), Chap. 3.
47. D. Treppman, E. Hornbogen, and D. Wurzel, «The Effect of Combined Recrystallization and Precipitation Processes on the Functional and Structural Properties in NiTi Alloys,» *Journal de Physique IV: Colloque C8, Suppl. au Journal de Physique* III, vol. 5, Proc. ICOMAT-95, R. Gotthardt and J. Van Humbeeck J., eds. (December 1995), pp. 569-574.
48. C. M. Wayman, «Transformation, Self-Accommodation, Deformation, and Shape Memory Behavior of NiTi Alloys,» *MRS Int'l. Mtg. on Adv.* Mats., 9, 63-76 (1989).
49. T. Saburi, «Structure and Mechanical Behavior of Ti-Ni Shape Memory Alloys,» *MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats.*, 9, 77-91 (1989).
50. T. Todoriki and H.Tamura, «Effect of Heat Treatment after Cold Working on the Phase Transformation in TiNi Alloy,» *Trans. of the Jap. Inst. of Metals*, 28, 83-94 (1987).
51. M. Nishida, C. M. Wayman and T. Honma, «Precipitation Processes in NearEquiatomic TiNi Shape Memory Alloys,» *Met. Trans.*, 17 A, 1505-1515 (1986).
52. C. M. Wayman, «Phase Transformations in NiTi Type Shape Memory Alloys, Proc. Int. Cont. On Mart, Transf, 1986,» *The Jap. Inst. of Metals*, pp. 645-652.

53. K. Otsuka and C. M. Wayman, eds., *Shape Memory Materials* (Cambridge University Press, 1998).
54. *SMA Inc.,* Company data sheet.
55. J. M. Gere and S. Timoshenko, eds., *Mechanics of Materials*, CBS Publisher, 1986.
56. D. Y. Li and R. Liu, Wear, 225-229, 727-783 (1999).
57. T. Dueng [et al.], *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* [n. pb.], Butterworth-Heinemann, 1990).
58. P. H. Lin, H. Tobushi and K. Tanaka, «Influence of Strain-Rate on Deformation Properties of TiNi Shape-Memory Alloy,» *JSME Intl. J. Ser. A- Mech. Mater. Eng.*, 39 (1), 117-123 (1996).
59. K. H. Eckelmeyer, «The Effect of Alloying on the Shape Memory Phenomenon in Nitinol,» *Scripta M*et., 10, 667-672 (1976).
60. T. Honma [et al.], Effects of Addition of 3D Transition Elements on the Phase Transformation in TiNi Compound, *Proceedings* ICOMAT-79, pp. 259-264.
61. P. Huisman-Kleinherenbrink, «On the Martensitic Transformation Temperatures of NiTi and Their Dependence on Alloying Elements,» Ph.D. thesis, University of Twente, The Netherlands, 1991.
62. V. N. Kachin, «Martensitic Transformation and Shape Memory Effect in B2 Intermetallic Compounds of Ti,» *Revue Phys.* Appl., 24, 733-739 (1989).
63. V. N. Kachin [et al.], «Martensitic Transformation and Shape Memory Effect in Polycomponent TiNi-Based Alloys,» ICOMAT-95 Proceedings, Part I and II, Lausanne, France, R. Gotthardt and J. Van Humbeeck (Eds.), Editions de Physique, *Journal de Physique*, IV, 5 (8),760-770 (1995).
64. T. Saburi [et al.], «Mechanical Behaviour of Shape Memory Ti-Ni-Cu Alloys,» *MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats.*, 9, 147-152 (1989).
65. H. Horikawa and T. Ueki, «Superelastic Characteristics of Ni- Ti-Cu-X Alloys,» *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.*, 18B, 1113-1116 (1993).
66. K. N. Melton, J. L. Proft and T. W. Duerig, «Wide Hysteresis Shape Memory Alloys Based on the Ni-Ti-Nb System,» *MRS 1nt'l. Mtg. on Adv. Mats.*, 9, 165-170 (1989).

67. J. H. Yang, and J. W. Simpson, *Stress-Induced Transformation and Superelasticity in Ni- Ti-Nb Alloys, ICOMAT-95 Proceedings*, Part I and II, Lausanne, France, R. Gotthardt and J. Van Humbeeck (eds.), Editions de Physique, *Journal de Physique, IV,* 5(8), 771-776.
68. Z. Pu, H. Tseng and K. Wu, «Martensite Transformation and Shape Memory Effect on NiTi-Zr High-Temperature Shape Memory Alloys,» Florida International University, Miami, U.S. Army Res. Office, Research Triangle Park, NC, Rept. DAALO3-91-G-0245, October 17, 1995, p. 9.
69. K. H. Wu,, Development of High-Temperature Two-Way Shape Memory Alloys, Florida International University, Miami, U.S. Army Res. Office, Research Triangle Park, NC Rept. DAALO3-91-G-0245, January 10, 1991 to March 31, 1995, p. 109.
70. D. Z. Yang, Pu, Z. and K. H. Wu, *A Metal-Based Intelligent Composite with SMA Materials, Proc. Fourth Intl. Con. Adaptive Structures, November 2-4, 1993, Cologne, Germany*, pp. 405-417.
71. K. L. Fukami-Ushiro and D. C. Dunand, *NiTi and NiTi-TiC Composites, PT3: Shape-Memory Recovery, MIT*, November 26, 1995.
72. Van Humbeeck, J., *Shape Memory Materials: State of the Art and Requirements for Future Applications, J. Phys. IV: Colloque C5, Suppl. au Journal de Physique III, 7*, November 1997, pp. C5-3-12.
73. E. W. Collings, «The Physical Metallurgy of Titanium Alloys,» *ASM* Series in Metal Processing (1984).
74. O. M. Ivasishin [et al.], Crystallographic Features of II-Martensite in Titanium Alloys, ICOMAT-95 Proceedings, Parts I and II, Lausanne, France, R. Gotthardt and J. Van Humbeeck (eds.), Editions de Physique, *Journal de Physique, IV*, 5(8), 1017-1022 (1995).
75. C. Baker, «The Shape Memory Effect in a Ti-35wt% Nb Alloy,» *Metal Sci. J.*, 5, 92-100 (1971).
76. H. Sasano and T. Suzuki, «Shape Memory Effect in Ti-Mo-Al Alloys,» *5th Proc. Intl. Conf of Titanium*, 3, 1667-1674 (1984).

77. T. Hamada, T. Sodeoka and M. Miyagi, «Shape Memory Effect of Ti-Mo-Al Alloys,» *Proc. Intl. Conf of Titanium*, 2, 877-882 (1988).
78. T. Sugimoto [et al.], «Shape Recovery and Phase Transformation Behaviour in Ti-Mo-Al-Sn-Zr Alloys,» *Proc. Intl. Conf of Titanium*, 2, 1069-1074 (1988).
79. T. Sohmura and H. Kimura, «Shape Recovery in Ti-V-Fe-Al Alloy and Its Application to Dental Implant, ICOMAT-86,» *NARA*, pp. 1065-1070.
80. Fedotov, S. G. [et al.], «Phase Transformations During Heating of Metastable Alloys of the Ti-Ta System,» *Phys. Met. Metall.*, 62, 109-112 (1986).
81. T. W. Duerig [et al.], «Formation and Reversion of Stress-Induced Martensite in Ti-10V-2Fe-3Al,» *Acta Met.*, 30, 2161-2172 (1982).
82. «Europa'ïsche Patentanmeldung 0062365,» *anmeldetag* (3 November 1982).
83. C. Y. Lei, [et al.], Development of Pseudoelastic Beta Titanium Orthodontic Wires, Proc., Wayman Symposium, May 1996, K Inoue et al., eds., TMS Publications, 1998, pp. 413-418.
84. D. Yang, and Z. Wei, «Dalian University of Technology,» in: M. Schwartz, ed., *Encyclopedia of Smart Materials* (New York: John Wiley & Sons, 2002), vol. 1, pp. 551-558.
85. D. J. Barrett, «Metal Matrix Composite Reinforced with Shape Memory Alloy, Dept. of the Navy, Washington, D.C., *NTIS Alert*, 96 (21), (1 November 1996).
86. K. Sugimoto, K. Kamei and M. Nakaniwa, «Engineering Aspects of Shape Memory Alloys,» in: T.W. Duerig, ed., (London: Butterworth-Heinemann Ltd., 1990), pp. 89-95.
87. R. D. Jean, T. Y. Wu and S. S. Leu, *Scripta Metall.*, 25, 883-888 (1991).
88. M. Igharo, and J. V. Wood, *Powder Met.*, 28, 131-139 (1985).
89. J. Janssen [et al.], *J. de Physique*, 43,809-812 (1984).
90. N. Nakanishi, T. Shigematsu and N. Machida, Proc. Conf International Conference on Martensitic Transformations Monterey, CA, July 1992, Monterey Institute for Advanced Studies, pp. 1077-1082.

91. Y. D. Kim and C. M. Wayman, *Scripta Metall*., 24, 245-250 (1990).
92. S. M. Tang,, C. Y. Chung and W. G. Liu, « Preparation of Cu-Al-Ni-Based Shape-Memory Alloys by Mechanical Alloying and Powder-Metallurgy Method,» J. *Mater. Proc. Technol*., 63 (1-3), 307-312 (1997).
93. N. B. Potluri, «Joining of Shape Memory Alloys,» *Welding J*., 39-42 (1999).
94. C.-C. Hsu and W.-H. Wang, « Superplastic Forming Characteristics of a Cu-Zn-Al-Zr Shape-Memory Alloy», *Mater. Sci. Engrg*., and A- *Structural Materials Properties Microstructure and Processing,* 205(1-2), 247-253 (1996).
95. *AWS Welding Handbook* (Miami: American Welding Society, 1998), Part 2, vol. 4: *Materials and Applications*.
96. S. Suresh [et al.], «Experimental Investigation on the Distribution of Residual Stresses in Weldments Associated with Fabrication-Related Processes,» *Proc. Intl. Conf Weld. Technol*., University of Roorkee, India (1988), pp. 125-132.
97. N. B. Potluri [et al.], Fatigue Behavior of Thermit Welded Medium Manganese Rail Steel, Proc. lntl Symp. Fatigue and Fracture in Steel and Concrete Structures, SERC, Madras, India, 1991, pp.1055-1065.
98. H. M. Hussain [et al.], «Properties of Pulsed Current Multipass GMA-Welded Al-Zn-Mg Alloy,» *Welding J*., 75 (6), 209-s to 215-s (1996).
99. N. B. Potluri [et al.], «Studies on Weld Metal Characteristics and Their Influence on Tensile and Fatigue Properties of Pulsed Current GMA Welded AI-Zn-Mg Alloy,» *Welding J*., 75(2), 62-s to 70-s (1996).
100. K. K. Murthy, N. B. Potluri and S. Sundaresan, «Fusion Zone Microstructure and Fatigue Crack Growth Behavior in Ti-6Al-4V Weldments,» *Mater. Sci. Technol*., 13, 503-310 (1997).
101. *AWS Welding Handbook* (Miami: American Welding Society, 1996) Part 1, Vol. 3, Materials and Applications,.
102. W. F. Gale and Y. Guan, «Microstructural Development in Copper-Interlayer Transient Liquid Phase Bonds between Martensitic NiAl and NiTi,» *J. Mater Sci*., 32, 357-364 (2000).

103. A. Hirose and N. Araki, «Welding Shape Memory Alloys,» *Metals*, 59(8), 61-68 (1989).
104. M. Nishikawa, «Welding Shape Memory Alloys,» *Bull. Metals Soc*., 24 (1), 56-60 (1985).
105. T. Araki [et al.], «Characteristics and Fracture Morphology of Ti-Ni Type Shape Memory Alloy and Its Laser Weld Joint,» *Materials*, 38(428), 478-483 (1989).
106. EWI Develop a Technique for Welding Nitinol Shape Memory Alloy to Stainless Steel, EWI Insights, Technology Update, www.ewi.org, 2001, p. 5.
107. M. Nishikawa, «Welding Problems of Shape Memory Alloys,» *Metals*, 53 (6), 36-41 (1983).
108. T. Hall, Joint, a Laminate, and a Method of Preparing a Nickel-Titanium Alloy Member Surface for Bonding to Another Layer of Metal, U.S. Patent 5,354,623, 1994.
109. Z. Y. Zheng [et al.], Pr*oc. lntl Meet Adv. Mater*., Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 1989, p. 117.
110. G. Chamberlain, «Exotic Materials Enter the Marketplace,» *Design News*, 27 March, 1995, p. 23.
111. C. M. Jackson H. J. Wagner and R. J. Wasilewski, 55-Nitinol The Alloy with a Memory: Its Physical Metallurgy, Properties, and Applications, NASA Report SP-5110, Washington, D.C, 1972, p. 74.
112. R. Feynman, There's Plenty of Room at the Bottom, Annual Meeting of the American Physical Society, December 29, 1959, Caltech Engineering and Science, February 1960.
113. W. Lang, Silicon Microstructuring Technology, Material Science and Engineering: Reports R17, No. 1, pp. 1-55, 1988.
114. S. Miyazaki and A. Ishida, «Martensitic Transformation and Shape Memory Behavior in Sputter-Deposited Ti-Ni-Base Thin Films, Materials Science and Engineering,» A273-275, 1999, pp. 106-133.
115. E. Makino, M. Uenoyama and T. Shibata, «Flash Evaporation of TiNi Shape Memory Thin Film for Microactuators,» *Sensors and Actuators*, A 71, 187-192 (1998).
116. S. Eucken, «Shape Memory Effect in Alloys Produced by Meltspinning, Progress,» in: Shape Memory Alloys, S. Eucken, ed., *DGM Informationsgesellschaft*, pp. 239-277.

117. J. A. Walker, K. J. Gabriel and M. Mehregany, «Thin-Film Processing of TiNi Shape Memory Alloy,» *Sensors and Actuators*, A21, 243-246 (1990).
118. Buchaillot, L., Nakamura, S., Nakamura, Y., Ataka, M., and Fujita, H., Constitutive Parts of a Shape Memory Alloy Titanium-Nickel Thin Film Catheter, Proc. of 2nd lntl Conf on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, CA, 1997, pp. 183-188.
119. R. H. Wolf and A H. Heuer, «TiNi (Shape Memory) Films Silicon for MEMS Applications,» *J. Microelectromechanical Syst*., 4 (4), 206-212 (1995).
120. L. Schetky, Mc, The Present Status of Industrial Applications for Shape Memory Alloys, *Proceedings: Shape Memory Alloys for Power Systems*, Palo Alto, CA, 1994, pp. 4.1-4.11.
121. T. Lehnert [et al.], «A New Fabrication Process for Ni Ti Shape Memory Thin Films,» *J. Mater. Sci. Eng*. A, 273-275, 713-716 (1999).
122. *Nickel*, 16 (4), 6 (2001).
123. V. Brailovski, E. Trochu and A. Leboeuf, «Design of Shape Memory Linear Actuators,» *Proc. 2nd lntl. Conf on Shape Memory and Superelastic Technologie*s, Pacific Grove, CA, 1997, pp. 227-232.
124. N. B. Morgan, «The Stability of NiTi Shape Memory Alloys in Actuator Applications,» Ph.D thesis, Cranfield University, U.K., 1999.
125. D. Stöckel, *Proceeding Actuator*-92 (1992)S.
126. C.M. Jackson, H. J. Wagner and R. J.Wasilewski, NASA Report SP-5110, Washington, D.C, 1972, pp. 74,78, 79.
127. A. Stikeman, «Attractive Shapes,» *Techno. Rev*. (July/August 2001), p. 32.
128. E. H.Phillips, «Memory Alloys Key to «Smart Wing,",» *Av. Wk. & Sp. Technology* (22 July 1996), p. 68.
129. R. Y. Myose [et al.], «Leading Edge Deicing,» *Aerospace Eng*. (April 2000), pp. 26-29.
130. R. W. Prouty, «Smart Materials and Helicopters,» *Rotor & Wing* (May 1996), p. 62.
131. C. M.Wayman, J. *Met*. (June 1980), pp. 129-137.
132. L. McD Schetky, *Sci. Am*., 241(5), 79, 81 (1979).
133. http://www.techtran.smfc.nasa.gov/new /memmetal.html.

134. H.Tamura, Proc.*: Shape Memory Alloys Power Syst*. (Palo Alto, CA: [n.pb.] 1994, pp. 8-3, 8-5.
135. D. Stöckel, *Adv. Mater. Process*. (October 1990), pp. 35, 38.
136. «Market Forecast,» *High-Tech Materials Alert* (21 June 1996), pp. 1-4.
137. W.V. Moorleghem, *Proc: Shape Memory Alloys Power Syst*., Palo Alto, CA, 1994, pp. 9-1, 9-3.
138. J. P. O'Leary, J. E. Nicholson and R. E. Gatturna, in: *Engineering* Aspects of Shape Memory Alloys (London: Butterworth-Heinemann, 1990), p. 477.
139. *Mitek Surgical Products*, Inc., Company Brochure, 1995.
140. J. Stice, in: *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* (London: ButterworthHeinemann, 1990), p. 483.
141. http://www.nitinolmed.com/products/.
142. http://www.nidi.org/nickel/0602/5b.htm.
143. http://www.agamedical.com/patients / index.html.
144. J. Haasters, in: *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* (London: Butterworth-Heinemann, 1990), pp. 426-444.
145. E. H. Silver, *Biomaterials, Medical Devices and Tissue Engineering* (London: Chapman & Hall, 1994).
146. D. Poulmaire, eds., [et al.], 2nd Plasma- Technik Symp., Proc., Vol. 3, June 1991, Lausanne, Switzerland Plasma Technik AG, Wohlen, Switzerland, 1991, pp. 191-199.
147. K. Soballe, «Acta Orthopaedica Scandinavica,» *Suppl*. 255, 64 (1993).
148. P. Filip, R. Melicharek and A. C. Kneissl, «Hydroxyapatite Coatings on TiNi Shape-Memory Alloys,» *Zeitschrift Für Metallkunde*, 88 (2) (1997).
149. «Shape Memory Alloys: Medical and Dental Applications,» *NTIS Alert*, 96(5), 33 (1996).
150. D. Stöckel, *Proc.: Shape Memory Alloys Power Syst.,* Palo Alto, CA, 1994, pp. 1-9.
151. http://www.alphagalileo.org/,accessed 20 September 1999.
152. A. S. Whittaker [et al.], «Structural Control of Building Response Using Shape-Memory Alloys, Phase I, Construction Engrg. Res. Lab., U.S. Army, Champaign, IL,» *NTIS Alert*, 96(8), 28-29 (1996).
153. http://www.yet2.com/app/utility/external/indextechpak/29617. accessed July 7, 2003.

154. J. Cederstrom, Proc: Shape Memory Alloys Power Syst., Palo Alto, CA, 1994, pp. 6-2 to 6-7.
155. «Power Generation System Using Shape Memory Alloy,» *JETRO* (May 1997), p. 2.
156. P. Wollants [et al.], Nitinol Heat Engine Conf., *Silver Spring*, MD (1978), pp. 6.10 to 6.22.
157. «Shape-Memory-Alloy Thermal-Conduction Switches, *NASA Tech* Briefs,» (February 1999), p. 64.
158. Locking Key, *Design* News (March 3 1997), p. 70.
159. E. J. Graesser, «Effect of Intrinsic Damping on Vibration Transmissibility of Nickel-Titanium Shape-Memory Alloy Springs,» *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*, 26 (11) (1995).
160. H. Funakubo, ed., *Shape Memory Alloys* (New York: Gordon and Breach, 1987), pp. 201, 206.
161. E. Cydzik, in: *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys* (London: Butterworth-Heinemann, 1990), pp. 149-157.
162. J. E. Krumme, *Connection Technol.*, 3 (4), 41 (1987).
163. http://www.sma-mems.com/t.film.htm.
164. Johnson, A. D. and Busch, J. D., Proc. 1st Intl. Con. Shape *Memory Superelastic Technol.,* Pacific Grove, CA, 1994, pp. 2-304.
165. Ishida, A, Sato, M., and Takei, A, Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science, 27(12), 1996.
166. Bendahan, M., Seguin, J. L., and Canet, P., NiTi Shape-Memory Alloy Thin Films Composition Control Using Optical-Emission Spectroscopy, *Thin Solid Films,* 283 (1-2), 1996.
167. S. Miyazaki, T. Hashinaga and A. Ishida, «Martensitic Transformations in Sputter-Deposited Ti-Ni-Cu Shape-Memory Alloy Thin-Films, «*Thin Solid Films*, 28 (1-2) (1996).
168. «Shape Memory Alloy Film Changing Gradually with Temperature,» *JETRO* (October 1995), pp. 19-20.
169. A. Lee [et al.], *Sensors and Actuators*, A54, 755-759 (1996).
170. H. Yoshida, «Composite Structure with Temperature-Dependent Shape Reversal, 96-03-001-03,» *JETRO*, 23 (12), 18-19 (1996), Nat. Insti. of Materials & Chemicals Research, AIST.
171. K. Kuribayashi and T. Fujii, A New Micro SMA Thin

Film Actuator Prestrained by Polyimide, Proc. Intl. Symp. on Micromechatronics and Human Science, Piscataway (NJ: IEEE, 1998), pp. 165-70.

172. J. D. Busch and A. D. Johnson, Shape-Memory Alloys Micro-Actuator, U.S. Patent, WO 91/00608, June 27, 1989.
173. A D. Johnson and V.V. Martynov, «Applications of Shape-Memory Alloy Thin Film,» Proc. 2nd Intl. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies, Pacific Grove, CA, 1997, pp. 149-154.
174. M. Kohl, «Strobanek and S. Miyasaki, «Stress-Optimised Shape Memory Microvalves,» *Sensors and Actuators*, A72, 243-250 (1999).
175. Y. Bellouard [et al.], «A New Concept of Monolithic Shape Memory Alloys Microdevices Used in MicroRobotics,» Proc. Actuators, H. Borgmann (ed.) (1998), pp. 502-505.
176. «Fabricating Composite-Material Structures Containing SMA Ribbons,» *NASA Tech Briefs* (February 2003), pp. 57-58.
177. «Cylindrical Shape-Memory Rotary/Linear Actuator, JSC,» *NASA Tech Briefs* (October 2002), p. 30.
178. «Latch-Release Pin Puller with Shape-Memory-Alloy Actuator,» *NASA Tech Briefs* (July 2002), pp. 72-72.
179. S. Biwa, K. Yamada, and E. Matsumoto, «Analysis of Bias-Type Using Shape-Memory Alloy Based on Its Thermomechanical Constitutive Description,» *SME Intl. Series A Mechanics and Material Engrg*., 39(4), 526-532 (1996).
180. D. C. Lagoudas and A. Bhattacharyya, «Modeling of Thin Layer Extensional Thermoelectric SMA Actuators,» *Texas A&M, NTIS Alert*, 97(3) (1997).
181. K. Ullakko, «Magnetically Controlled Shape-Memory Alloys A New Class of Actuator Materials,» *J. Mater. Eng. Perform*., 5(3),405-409 (1996).
182. K. Ullakko, P. T. Jakovenko and V. G. Gavriljuk, «High-Strength Shape Memory Steels Alloyed with Nitrogen,» *Scr. Metall. Mater*., 34, 6, 1996.
183. K. Ullakko, Magnetic Control of Shape Memory Effect, International Conference on Martensitic Transformations ICOMAT-95, August 20-25, 1995, Lausanne, Switzerland, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (Abstract).

184. K. Ullakko, Large-Stroke and High-Strength Actuator Materials for Adaptive Structures, Proc. 3rd Intl. Conf. on Intelligent Materials and 3rd European Conf. on Smart Structures and Materiels, June 3-5, 1996, Lyon, France, INSA de Lyon, France and University of Strathclyde, U.K, p. 6.
185. K. Ullakko, P. T. Jakovenko and V. G. Gavriljuk, New Developments in Actuator Materials as Reflected in Magnetically Controlled Shape Memory Alloys and High-Strength Shape Memory Steels, Proc. of Symp. on Smart Structures and Materials, February 26-29, 1996, San Diego, CA, Intl. Society for Optical Engineering, p. 9.
186. Z. Ding and D. C. Lagoudas, «Solution Behavior of the Transient Heat Transfer Problem in Thermoelectric Shape Memory Alloy Actuators,» *Texas A&M, NTIS Alert*, 97(3), 1-2 (1997).
187. Magnetic Shape Memory Alloy, Nickel, 17(3), 7, 2002.
188. J. Van Humbeeck, «Nonmedical Applications of Shape Memory Alloys,» *Mater. Sci. Eng.*, A273-275, 134-148 (1999).
189. T. Duerig, A. Pelton and D. Stöckel, «An Overview of Nitinol Medical Applications,» *Mater. Sci. Eng.*, A273-275, 149-160 (1999).
190. J. Van Humbeeck and R. Staimans, «Shape Memory Alloy Systems and Functional Properties,» in: M. Schwartz, ed., *Encyclopedia of Smart Materials* (New York: John Wiley & Sons, 2002), vol. 2, pp. 951-964.
191. Y. Bellouard, «Microrobotics, Microdevices Based on Shape-Memory Alloys,» in: M. Schwartz, ed., *Encyclopedia of Smart Materials* (New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002), vol. 1, pp. 620-644.
192. W. Nix, «Yielding and Strain Hardening of Thin Metal Films on Substrates,» *Scripta Materialia*, 394/5,545-554 (1988).
193. F. Mucklich and H. Janocha, «Smart Materials The IQ of Materials in Systems,» *Zeitschrift Fur Metallkunde*, 87(5), 357-364 (1996).
194. A. J. Bard [et al.], *Ace. Chem. Res.*, 23, 357-363 (1990).
195. T. Thundat [et al.], *S. M., J. Vac. Sci. Techno*l., A8, 3537-3541 (1990).
196. Newnham, RE., *MRS Bulletin*, 4, 24-33 (1993).

197. K. E. Drexler, *Nanosystems, Molecular Machinery, Manufacturing and Computation* (New York: John Wiley & Sons, 1992).
198. S. I. Aizawa, Proc. Bionics Design Intl. Workshop, Tsukuba, Japan, 1992.
199. D. DeRossi, in: C. R. Rogersand and G. G. Wallace, eds., Proc. 2nd Conf. Intellig. Mat. ICIM '94 (Lancaster, Basel: Technomic Publ. Comp., 1994), pp. 44-51.
200. J. Unsworth, in: C R Rogersand G. G. Wallace, eds., Proc. 2nd Conf. Intellig. Mat. ICIM '94, Lancaster (Basel: Technomic Publ. Comp., 1994), pp. 23-32.
201. N. Ogata, in: C. R. Rogersand and G. G. Wallace, eds., Proc. 2nd Conf. Intellig. Mat. ICIM '94, Lancaster (Basel: Technomic Publ. Comp., 1994), pp. 13-22.
202. D. T. Clark, in: C. R Rogersand G. G. Wallace, eds, Proc. 2nd Conf. Intellig. Mat. ICIM '94, Lancaster (Basel: Technomic Publ. Comp., 1994), pp. 3-12.
203. Y. Liu [et al.], Sh*ape Memory Polymers for Medical Applications*, Dept. of Mech. Engrg., University of Colorado (Boulder, CO, AM&B December 2003), pp. 31-32.

# المراجع

Adler, P. «Manufacture of Nitinol Tubing.,» *AM&P*: August 2003, p. 53.

Bai, Y-J [et al.]. «Microstructural Origin of Degradation of Shape Memory Effect during Martensite Aging of CuZnAlMnNi Alloy.,» J. *Adv. Mater.*, to be published, 2005.

Dunand, D. C. [et al.]. « Neutron Diffraction Study of NiTi during Compressive Deformation and after Shape-Memory Recovery, Intl. Conf. on Martensitic Transformations.,» Lausanne, Switzerland, *NTIS Alert*: 96 (3), 1 February 1996.

Fukami-Ushiro, K. L. and D. C. Dunand. « NiTi and NiTi-TiC Composites ShapeMemory Recovery.,» *Metallurgical and Materials Transactions A Physical Metallurgy and Materials Science*: 27 (1), 193-203, 1996.

Goldberg, D., Y. Xu and Y. Murakami. «Characteristics of Ti50Pd30Ni20 HighTemperature Shape-Memory Alloy.,» *1ntermetallics*: 3 (1), 35-46, 1995.

Han, X. D., W. H. Zou and R. Wang. « Structure and Substructure of Martensite in a Ti36.5Ni48.5Hf15 High-Temperature Shape-Memory Alloy.,» *Acta Materialia*: 44 (9), 3711-3721, 1996.

Hurlbut, B. J. and M. E. Regelbrugge. «Evaluation of a Constitutive Model for Shape-Memory Alloys Embedded in Shell Structures.,» *J. Reinforced Plastics and Composites*, 15 (12), 1249-1261, 1996.

Inagaki, H. and K.Inoue. «Effect of Mn on the Shape-Memory Effect in Fe-Mn-SiCr-Ni Alloys.,» *Zeitschrift Für Metallkunde*: 85 (11), 790-795, 1994.

Inque, H., N. Miwa and N. Inakazu. «Texture and Shape-Memory Strain in TiNi Alloy Sheets.,» *Acta Materialia*, 44 (12), 4825-4834, 1996.

«Investigation of Power Generation System Using Shape Memory Alloys,» New Energy Dev. Org., Tokyo, Japan, *NTIS Alert*: 86 (8), 1-2, 1996.

Lam, C. W. H., C. Y. Chung and C. C. Ling. «Removal of Martensite Stabilization in Cantim Shape-Memory Alloy by Post-Quench Aging.,» J. *Mater. Proc. Technol.*: 63 (1-3), 600-603, 1997.

Lee, C. H. and C. T. Sun. «The Nonlinear Frequency and Large-Amplitude of Sandwich Composites with Embedded Shape-Memory Alloy.,» *J. Reinforced Plastics and Composites*: 14 (11), 1160-1174, 1995.

Lin, P. H., H.Tobushi and K.Tanaka. «Deformation Properties of TiNi ShapeMemory Alloy.,» *JSME 1ntl. J. Ser. A- Mech. Mater. Eng.*: 39 (1), 108-116, 1996.

Pons, J. and R. Portier. «Accommodation of Gamma-Phase Precipitates in Cu-ZnAl Shape-Memory Alloys Studied by High-Resolution Electron-Microscopy.,» *Acta Materialia*: 45 (5), 2109-2120, 1997.

Shape Memory Alloys: Medical and Dental Applications, NER-AC, Inc., Tolland, CT, NTIS Alert: 97 (7), April 1, 1997.

Shield, T. W., P. H. Leo and Grebner. «C C, Quasi-Static Extension of ShapeMemory Wires under Constant Load.,» *Acta Materialia*: 45 (1), 67-74, 1997.

Xu, Y., Shimizu, S. and Y. «Suzuki, Recovery and Recrystallization Processes in Ti-Pd-Ni High-Temperature Shape-Memory Alloys.,» *Acta Materialia*: 45 (4), 1503-1511, 1997.

Yoshida, H. «Creation of Environmentally Responsive Composites with Embedded Ti-Ni Alloy as Effectors.,» *Adv. Camp. Materials*: 5 (1), 1-16, 1995.

Yungang, T. and T. Baoqi. Smart Composite Damage Assessment System Based on the Neural Network, National Air Intell. Center, *NTIS Alert:* 96 (14), 18-19, 1996.

# 5

## المواد النانوية البُنية

العلم والهندسة النانويان هما موجة الاكتشافات العلمية في هذا العصر، وهما على درجة من الأهمية في جميع تخصصات ومجالات الاقتصاد من حيث تركيز معظم الاهتمام بالمفاهيم الجوهرية الجديدة للتصنيع والقياسات في المجال النانوي.

على غرار كل تقانة بازغة، ثمة تساؤلات عن المضامين الاجتماعية لهذه التقانة. إن تلك المضامين كثيرة جداً، ومنها زيادة الإنتاجية، وتحسين الرعاية الصحية، وتوسيع آفاق التطور المستديم على الأرض. وفي ضوء التقانات الموجودة حالياً، ثمة حد لعدد الناس الذين يستطيعون العيش على الأرض بالاعتماد على موارد الطبيعة. لكن إذا حسَّنا تلك التقانات، بالانتقال إلى سيرورات عديمة الهدر، أو تحتاج إلى مقادير صغيرة من المواد، أمكن توسيع ذلك الحد. وعلى غرار أي تقانة جديدة أيضاً، ثمة مفاعيل اجتماعية من قبيل الآثار السلبية المحتملة التي يمكن أن تنجم، مصادفة، عن انتشار المواد في البيئة المحيطة. كل هذا يجب أن يُؤخذ في الحسبان.

إلا أننا نتحرك إلى الأمام لأن جميع الدلائل تشير حتى الآن إلى أن مزايا التقانة النانوية تفوق كثيراً العواقب المحتملة غير المتوقعة. على سبيل المثال، يمكن للجُسيْمات النانوية أن تستهدف خلايا السرطان، وتمكِّن من تشخيص الأمراض قبل استفحالها. وفي الوقت

نفسه، يمكن أن تكون للجُسيْمات النانوية مفاعيل لم تتحدَّد تماماً حتى الآن. إن الجانب الإيجابي هو أن الجُسيْمات النانوية موجودة فعلاً في جميع أنحاء الأرض. وباستخدام التقانة النانوية، يمكن دراسة مسائل موجودة لا يمكن حلها بطرائق أخرى.

وفي الوقت نفسه، يجب أن نطوِّر التقانة النانوية بطريقة مسؤولة. فعلينا أن نولي انتباهاً كافياً لقضايا البيئة والصحة، إضافةً إلى القضايا الأخلاقية والاقتصادية[1].

قيل إن التقانة النانوية معقّدة بمقدار تعقيد برنامج الفضاء نفسه. والفائدة الرئيسة من برنامج الفضاء هي تحصيل المعرفة عن الكون. أما التحرّك باتجاه التقانة النانوية، فهو ليس مثيراً فحسب، بل سوف يغير أيضاً طريقة عيشنا على الأرض. كلاهما، برنامج الفضاء والتقانة النانوية، ينطويان على الكثير من الإثارة، إلا أن الفارق بينهما هو أن التحرّك باتجاه العالم النانوي ينطوي على مضامين مهمة لظروف العيش على الأرض، وعلى تأثيرات في الصحة قد تكون أهم مما أتت به أي تقانة أخرى حتى الآن. إن القاعدة العلمية للتقانة النانوية في قيد التطوُّر الآن.

ثمة عدة أطوار في التقانة النانوية. الطَور **الأول**، وهو الذي نشهده حالياً، يتعامل مع البُنى النانوية، وقد بدأ بالتحكُّم المنهجي فيها. والطَور **الثاني**، الذي سوف يأتي بعد ثلاث أو أربع سنوات، سوف يحصل عندما نبدأ بالحصول على بُنى نانوية نشطة من قبيل الترانزستورات والمفعِّلات وتجهيزات تزويد الجسم بالدواء. وسوف تنقضي سنوات عدة أخرى قبل أن تصبح لدينا نظم نانوية.

إننا نتحرك في ذلك الاتجاه، والسؤال الذي يطرح نفسه هو: إلى أي مدى سوف نذهب؟ صحيحٌ أن برنامج الفضاء أدّى إلى

تطوير معارف كثيرة، إلا أن التقانة النانوية سوف تؤدّي إلى معارف أكثر، إضافة إلى اهتمامها بتحقيق قدر مماثل من المعرفة والفهم فور تطويرنا الأدوات اللازمة لهما، وهذا سوف يمثّل منعطفاً كبيراً للاقتصاد.

لا يمكن التوقّع تماماً بالمدة التي سوف يستغرقها تطوير التقانة النانوية. فكثير من التطورات تحصل بالفتوحات العلمية والتقانية، لذا لا نستطيع تحديد خط زمني لتطوُّر كل حدث. لكن ما يجب إدراكه هو أننا ما زلنا في بداية الطريق، ومعظم الأنشطة التي تحصل اليوم في التقانة النانوية تقوم على التجربة والاستفادة من الخبرات في حقول أخرى سبقت التقانة النانوية.

تتألَّف الصورة البعيدة المدى للتقانة النانوية من ثلاثة أو أربعة مكوِّنات. ليس مُهمّاً ما يحصل في المستوى المجهري، بل ما هو أكثر أهمية هي الظواهر والسيرورات الجديدة والوظائف الجديدة التي تحصل في مستوى المقاسات المتوسطة. وليس مهماً أن تعمل في تخصُّص معيّن، بل المهم هو تبادل الوسائل والطرائق والبنيانات والتطبيقات في ما بين مختلف التخصُّصات. ومن المهم أيضاً أن تكون لديك المقدرة على الانتقال إلى التقانة النانوية بمقدار صغير من الطاقة أو المادة، وأن تفعل الأشياء التي لا يمكن فعلها في أي سلّم مقاسات آخر، على أساس مُجْدٍ اقتصادياً.

وهذا التطوّر هو تطوّر جدي، ليس خيالاً علمياً أو ثرثرة إعلامية. إنه حقيقي، وهو يتغلغل في كثير من المجالات، وتوسُّعه متوقع في أربعة حقول جديدة: نظم الغذاء والزراعة، وتحويل وخزن الطاقة، والطب التجديدي والنانوي الحيوي، والبحوث والتربية البيئية، وفق رأي الدكتور روكو[2] (Roco).

السؤال الذي يبرز الآن هو: ما هو عدد الذرّات اللازم لتكوين جسم صلب؟ يعتمد الجواب على نوع المادة، وعلى الخاصية موضع الاهتمام. في المعادن، وبرغم أن البنية البلّورية تتكوّن فعلياً بوجود 100 ذرّة، إلا أن درجة حرارة الانصهار الخاصة بالكتل الجسيمة لا تحصل إلا مع عناقيد مكوّنة من 1000 ذرّة. وفي البلّورات نصف الناقلة، يجب أن تكون ثمة 10 000 ذرّة لظهور تحريضات ضوئية مشابهة لتلك التي تحصل في الأجسام الكتلية. أما البلّورات النانوية فتقع في الحيز ما بين العناقيد الجُزَيئية والبلّورات الميكرويّة. وهي تتميز بمكوِّن داخلي مماثل بنيوياً لجسم صلب كبير، وبنسبة كبيرة مميَّزة من الذرّات المحتشدة عند سطح البُلَيْرة (Crystallite). إن الخواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الصلبة تتغيّر مع نقصان مقاس الجُسيْم إلى ما دون السلَّم الميكروي بسبب مفاعيل المقاسات الكمومية والتغيّرات المرافقة لها في البنية البلّورية.

ثمة نهجان رئيسان للتطوير العلمي والتقاني للبنى النانوية هما: الشبكات الفائقة وتجهيزات البئر الكمومية (Quantum Well)، والبُنى الميكرويّة المتعدّدة البلّورات الفائقة النعومة الثلاثية الأبعاد. تُعرَّف الأخيرة، التي تسمّى أيضاً المواد النانوية البلّورات، بأنها أجسام صلبة متعدّدة البلّورات ذات حُبيْبات مقاساتها من رتبة بضعة النانومترات[2]، وتتصف بأن حُبيْباتها ومساماتها وعيوبها وسماكات الملتقيات فيها جميعاً لها المقاسات نفسها.

المواد النانوية البنية هي أجسام صلبة مكوَّنة من عناصر إنشائية، بُلَيْرات في معظم الأحيان، بمقاس مميِّز (في اتجاه واحد على الأقل) من رتبة بضعة النانومترات. ويمكن تصنيف الأنواع المختلفة من المواد النانوية تبعاً لتركيبها الكيميائي وشكل (وعدد أبعاد) مكوِّناتها الإنشائية (انظر الشكل 5 ـ 1).

**الشكل 5 ـ 1: طريقة تصنيف المواد النانوية البنية تبعاً لتركيبها الكيميائي وأشكالها البلورية**[3].

بغرض التبسيط، سوف نبدأ أولاً بالمواد النانوية البنية المكوَّنة من بُلَيْرات نانومترية المقاس. وفقاً لأشكال البُلَيْرات، يمكن تمييز ثلاث فئات من المواد النانوية: بُلَيْرات طبقية الشكل، وبُلَيْرات قضيبية الشكل (بسماكة طبقة أو قطر قضيب من رتبة بضعة النانومترات)، وبُلَيْرات متساوية الأطوال المحورية نانومترية المقاس. واعتماداً على التركيب الكيميائي للبُلَيْرة، يمكن تفريق الفئات الثلاثة إلى أربعة طوائف. في أبسط حالة (الطائفة الأولى، الشكل 5 ـ 1)، تتصف جميع البُلَيْرات ومناطق الملتقيات بالتركيب الكيميائي نفسه. ومن أمثلة هذه الطائفة البوليمرات شبه المتبلورة (المكوَّنة من كدسة من الصفائح المتبلورة تفصل بينها مناطق غير بلّورية؛ الفئة الأولى في

الشكل 5 ـ 1)، أو مواد مصنوعة من بلّورات نحاس متساوية الأطوال المحورية مثلاً (الفئة الثالثة).

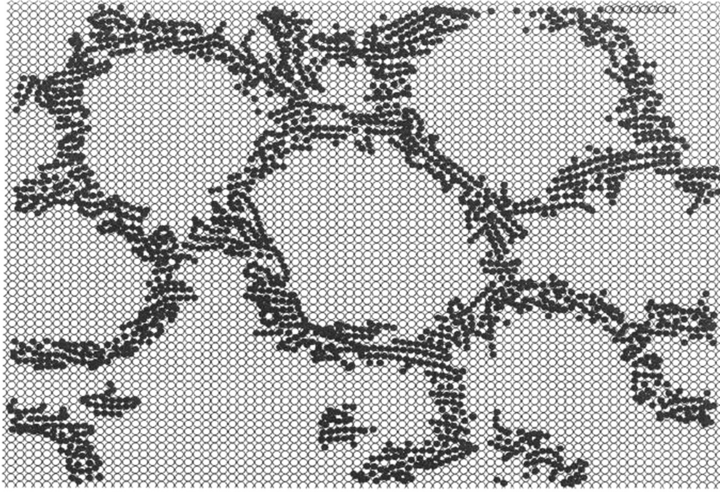
أما المواد النانوية البنية التي تنتمي إلى الطائفة الثانية فتتكوَّن من بلُّورات ذات تراكيب كيميائية مختلفة (مُشار إليها في الشكل 5 ـ 1 بتهشير مختلف). وبُنى البئر الكمومي (المتعدّدة الطبقات) هي على الأرجح أشهر مثال لهذا النوع (الفئة الأولى). وإذا حصل التغيُّر التركيبي بين البُلَيْرات ومناطق الملتقيات بشكل رئيس، حصلنا على الطائفة الثالثة من المواد النانوية البنية. في هذه الحالة، ينعزل نوع واحد من الذرّات (الجُزَيئات) تفضيلياً في مناطق الملتقيات بحيث يقترن التعديل البنيوي (بلُّورات/ملتقيات) بتعديل كيميائي محلي. إن المواد النانوية البنية التي تتألف من بلّورات نحاس نانومترية، مع ذرّات بيسموث منعزلة عند حدود الحُبيْبات هي مثال لهذا النوع (الفئة الثالثة).

وتتكوَّن الطائفة الرابعة من بلُّورات نانومترية (طبقية، أو قضيبية أو متساوية الأطوال المحورية) منتشرة ضمن حاضنة ذات تركيب كيميائي مختلف. والخلائط المقسَّاة بالترسيب هي مثال لهذه الطائفة من المواد النانوية البنية. ومن أمثلتها الأخرى مزائج البوليمرات شبه المتبلورة المصلَّدة بالقص (Shear). تتألف المواد النانوية البنية التي نُظر فيها حتى الآن من مكوِّنات بلُّورية بالدرجة الأولى، إلا أن ثمة مواد معروفة أخرى نانوية البنية أحد مكوِّناتها، أو جميعها، ليست بلورية. على سبيل المثال، تتألف البوليمرات شبه البلّورية من طبقات (سماكاتها نانومترية) بلورية وغير بلورية متناوبة. ومن الأمثلة الأخرى، الزجاجيات المتبلورة جزئياً. وتمثل المواد الزجاجية المتفكّكة سبينودالياً (Spinodally Decomposed Glasses) مواد نانوية البنية جميع مكوّناتها غير بلّورية. أخيراً، المواد البلُّورية وغير البلّورية

التي تحتوي على كثافة عالية من الفراغات النانومترية (الناجمة عن إشعاع جُسيْمات ألفا)، هي مواد نانوية البنية أحد مكوّناتها هو غاز أو فراغ[7](4).

## بنية وخواص المواد النانوية

تتألف بنية أحد أنواع المواد النانوية البُنية من بُلَيْرات نانومترية متساوية أطوال المحاور، مكوَّنة من نوع واحد من الذرّات (الشكل 5 ـ 1، الطائفة الأولى، الفئة الثالثة). وتتكون مادة من هذا النوع بنيوياً من المكوِّنين التاليين (انظر الشكل 5 ـ 2): البُلَيْرات (وهي ذرّات ممثلة بدوائر بيضاء) والمناطق الحدودية (الدوائر السوداء). إن البنية الذريّة لجميع البُلَيْرات متماثلة، والفارق الوحيد بينها هو توجُّه البلّورات. أما في المناطق الحدودية، حيث تتحد بلّورتان معاً، فالحالة مختلفة. وتختلف الكثافة الذريّة الوسطية، وعدد أقرب الذرّات المجاورة، في المناطق الحدودية، عنهما في البلّورات. إن وجود مكوِّنين بنيويين (البلّورات والحدود) بنسبتين حجميتين متقاربتين مع مقاسات نانومترية للبلّورات شيء مهم بالنسبة إلى خواص المواد النانوية البنية. فمن المعروف أن خواص الأجسام البلّورية الصلبة تعتمد على **(1)** أحجام المناطق البلّورية، و**(2)** على البنية الذريّة للجسم الصلب الموصَّفة بالكثافة الذريّة الوسطية والتنسيق في ما بين أقرب الجوار. إن هذين الموسطين هما بالضبط اللذان يختلفان حين مقارنة مادة جَسِيمة أحادية البلّورة بمادة نانوية البنية لها التركيب الكيميائي نفسه. في المواد النانوية البنية، يتقلَّص مقاس البلّورة إلى بضعة نانومترات، وأكثر من ذلك، تتغيّر الكثافة الذريّة الوسطية والتنسيق مع أقرب الجوار. لذا اقتُرح أن خواص المواد النانوية البنية تختلف عن تلك التي لأحاديات البلّورة[8].



**الشكل 5 ـ 2: نموذج حاسوبي لبنية ذرية. أُجريت الحسابات بنمذجة القوى في ما بين الذرات باستعمال طريقة كمون مورس** (Morse potential) **. الذرات السوداء (الحدود) هي ذرات تنحرف مواقعها بأكثر من 10 في المئة عن المواقع الشبكية الموافقة لها[3] .**

## البلّورات النانوية والمواد النانوية البلّورات

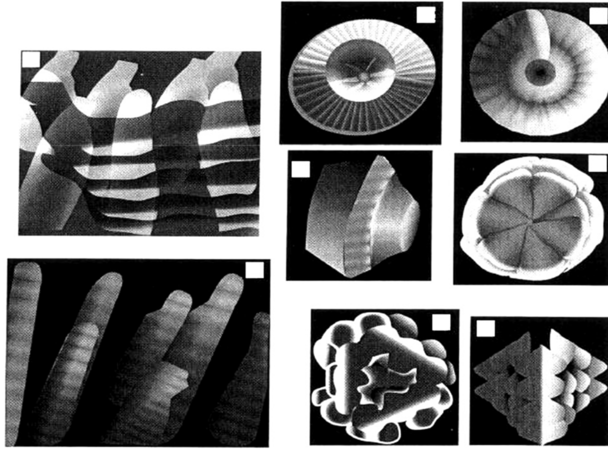
### البلّورات النانوية

يدرس المهندسون لدى مختبرات سانديا الوطنية (Sandia National Laboratory) قواقع بحرية وطحالب غنية بالسليكات، تمتص شوارد الكالسيوم والسليكات من ماء المحيط البارد بغية بناء نُسُج بلُّورية صلبة تحميها. والغرض من دراسة تلك البُنى (انظر الشكل 5 ـ 3) هو اكتشاف أساليب لبناء بُنى مشابهة باستخدام طرائق صديقة للبيئة عند درجات حرارة منخفضة. وهم يستخدمون حالياً درجات حرارة وتراكيز كيميائية منخفضة في بيئة مائية بدلاً من طريقة المذيب العضوي عند درجات حرارة وتراكيز مرتفعة التي هي أكثر استخداماً

لبناء البلّورات النانوية. وقد تمكَّن فريق العمل حتى الآن من التحكُّم بمكان وكيفية تكوُّن البلّورات في المراحل الأولى من دراستهم لها.

وطوَّر باحثون لدى وكالة حكومية أميركية أخرى، هي مختبرات آرغون الوطنية (Argonne National Laboratory)، سيرورة أدت إلى تركيب بلّورات نانوية، وهي جُسيْمات صغيرة لا تحتوي إلا على آلاف من الذرّات، عوضاً عن الملايين منها.

تعتمد السيرورة المطوّرة التي تستخدم المفاعل البلازمي لتحضير الأبخرة فيزيائياً (Physical Vapor Synthesis)، على تقنية مختبرات آرغون لصنع مواد نانوية الطَور من تجميع الأبخرة الفيزيائية في بلّورات نانوية باستخدام سيرورة الحمل الحراري الطبيعية لتكثيف الطَور الغازي.



**الشكل 5 ـ 3: صنع الباحثون بنى نانوية شبيهة جداً بالبنى الطبيعية. مثلا، (أ) قواقع حيوان أذن البحر ذي اللون الأحمر، (ب) بلورات صنعية من أكسيد الزنك، (ج) طحلب بحري، والصور (د حتى ح) بلورات سِليكا صنعية.**

تلك التقنية هي أساس مفاعل تحضير الأبخرة فيزيائياً الذي

تُستخدم فيه سيرورة الحمل الحراري القسري. والنتيجة النهائية هي مسحوق بلّورات نانوية ذات جُسيْمات ضعيفة التكتُّل وسطوح نظيفة، وهما صفتان تجعلان المسحوق مفيداً صناعياً. يُستخدم مفاعل تحضير الأبخرة فيزيائياً في صنع مساحيق تجميلية من قبيل الأصبغة وصادات أشعّة الشمس.

عمل العلماء لدى جامعة بردو سنين عديدة لإيجاد طريقة للإنتاج الكمي لبلّورات نانوية ضئيلة استثنائية القساوة لا يختلف مظهرها عن مظهر تلك المنتَجة في الورشة. ويقول أولئك الباحثون إنهم وجدوا أن القصاصات المعدنية الناجمة عن الخراطة والتثقيب والتفريز ممتلئة بالبلّورات النانوية، وهذا ينطوي على إمكانات لصنع قطع ميكانيكية ومواد مركَّبة فائقة القوة.

ويقولون أيضاً إن تلك القصاصات التي تُهمَل اليوم أو تُصهر لإعادة استخدامها، يمكن أن تكون مصدراً للبلّورات بتكلفة تساوي واحداً بالمئة من تكلفة إنتاجها بالطرائق الحالية.

ومطُّ المعدن أو تشويهه بانفعالات شديدة يُكسِّر تلك البنية البلّورية، مصغِّراً بعض البلّورات، وجاعلاً إياها أقوى وأقسى من البلّورات الطبيعية الحجم.

تحصل هذه الانفعالات في القصاصات المعدنية في أثناء الخراطة عند ضغط قلم خراطة معدني قاس بزاوية مقدارها 90 درجة على قضيب معدني دوار، وفقاً لرأي أستاذ الهندسة سرينيفاسان تشاندراسكار (Srinivasan Chandrasekar) لدى جامعة بردو في إنديانا.

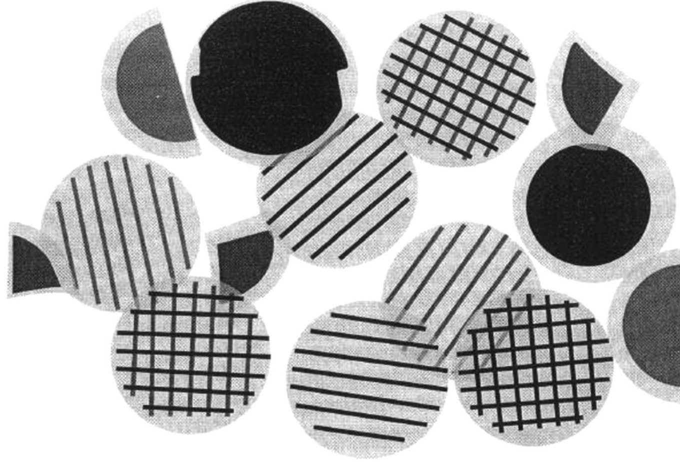
وقد أُثبت أن البلّورات النانوية من مختلف المواد أقسى بـ 100 حتى 300 في المئة من المادة نفسها بشكلها الجَسِيم. لذا يمكن أن

تُساعد على صنع قطع معدنية فائقة القوة، أو يمكن أن تُضاف إلى اللّدائن لصنع أنواع جديدة من المواد المركَّبة. إلا أنّ الطرائق الحالية للقيام بذلك عالية التكلفة، حيث يمكن أن تصل تكلفة صنع بلّورات نانوية إلى 100 دولار للأوقية الواحدة. أما باستخدام قصاصات المعدن المتبقّية من التشغيل الميكانيكي، فإن مهندسي جامعة بردو يقولون إنهم أوجدوا طريقة تكلف 1 دولار للأوقية، لإنتاج تلك المواد بكميات كبيرة.

وفي المستقبل، يمكن استخدام البلّورات النانوية المستخلصة من القصاصات في إنتاج محامل أطول عمراً، وأنواع جديدة من المحِسَّات والمكوّنات الحاسوبية والإلكترونية بتكاليف منخفضة. لكن ريثما يتحقّق ذلك، على الباحثين تحديد إن كانت البلّورات النانوية الموجودة في القشور والقصاصات المعدنية تحتفظ بخواصها بعد خطوات المعالجة المتبعة عادةً. وقد بيَّنت دراسات مخبرية أولية أنها تحتفظ بها[9].

وقاس المهندسون القساوة الزائدة في بلّورات نانوية من النحاس وفولاذ أدوات التشغيل والفولاذ العديم الصدأ وخليطتي فولاذ أخرتين والحديد، وبيَّنت نتائجهم أن هذه المواد نانوية التبلور، وأنها تمتلك خواص ميكانيكية محسَّنة (انظر الشكل 5 ـ 4).

لكن ثمة حاجة إلى مزيد من البحث لتحديد إن كانت البلّورات النانوية الموجودة في القصاصات الناجمة عن التشغيل تحتفظ بخواصها بعد خطوات المعالجة المعتادة. من تلك الخطوات طحن القصاصات لتحويلها إلى مسحوق، ثم كبس المسحوق وتسخينه لصنع قطع معدنية منه. وقد أُخضِعت عيّنات من البلّورات النانوية التي تُنتَج حالياً في المختبرات إلى عمليات من ذلك النوع، ووُجد أنها احتفظت بخواصها البلّورية النانوية.



**الشكل 5 ـ 4: ألوان متلألئة لبلورات نانوية مصنوعة من الياقوت الأزرق والسليكا المصهورة. تُولِّد بلورات الذهب المغلفة لوناً بنفسجياً أو أحمر، في حين أن بلورات الفضة النانوية تُعطي لوناً أصفر.**

ركَّب الباحثون في مختبرات أوك ريدج القومية (Oak Ridge National Laboratory) بلّورات نانوية معدنية ونصف ناقلة وُضِعت ضمن مواد من قبيل الياقوت الأزرق والسليكون المتبلور. وهم يأملون في التوقّع بحجوم بلّورات تلك المواد المركَّبة ذات البلّورات النانوية المنتَجة بجرعة كبيرة من الزرع الشاردي (Ion Implantation)، ببنيتها وخواصها الضوئية والفيزيائية، وفي التحكُّم بها. ونظراً إلى الطريقة الفريدة التي تشع تلك المواد الضوء بها، فإنها يمكن أن تُستخدم في تطوير حواسيب أسرع وأذكى، وشاشات مسطَّحة محسَّنة (الشكل 5 ـ 4).

واكتشف الباحثون لدى جامعة جورجيا طريقة لتنمية بلّورات نانومترية ضئيلة يمكن أن تكون مفيدة في صنع رقاقات أنصاف النواقل ومحفِّزات التفاعلات الكيميائية. يمكن لهذه البلّورات الضئيلة أن تحتوي على أصغر عدد ممكن من ذرّات الكربون (27) في البُنى

التكعيبية المكوَّنة من عنصرين، أحدهما هو الكربون، والآخر معدن.

تُنتَج هذه البلّورات النانوية بتبخير التيتانيوم أو معدن آخر بالصدمة الليزرية، ثم مزْج بخار المعدن مع الميثان، وهو غاز يحتوي على الكربون. ومع تقدم البحث، قد يمكن في النهاية تنمية بُنى كربونية معدنية أصغر كثيراً من الترانزستورات ورقاقات أنصاف النواقل الميكرويّة. وباستخدام بلّورات التيتانيوم ـ كربون النانوية محفِّزات للتفاعلات الكيميائية، يُتوقَّع أن تكون أعلى كفاءة بكثير من أي شيء معروف آخر. هذا لأن مفتاح سيرورات التحفيز هو مقدار مساحة السطح المعرَّض للتفاعل، وتقليص مقاسات جُزَيئات المحفِّز يزيد من نسبة السطح إلى الحجم فيها. لكن هناك شيئاً يجب تذكُّره هو أن هذا العمل ما زال في مرحلة الدراسات الأساسية، وليس مؤكداً أنه سوف يظهر إلى الواقع العملي.

وبنى الباحثون لدى معهد[10] Rensselaer بلّورات متناظرة كبيرة نادراً ما تتكون في الطبيعة. ويمكن لهذه البلّورات أن تكون أقسى من المواد الهندسية المعهودة. وقد حصل اكتشافها بالمصادفة في أثناء محاولة صنع بُنى نانوية فائقة الناقلية الكهربائية بتقنية بسيطة مستخدمة في صنع أنابيب كربون نانوية.

واستخدم بوليكل أجايان (Pulickel Ajayan) وغاناباثيرامان رامانات (Ganapathiraman Ramanath)، عضوا الهيئة التدريسية في كلية الهندسة وعلم المواد في المعهد المذكور، كربيد البورون، وهو مادة هندسية شائعة، في تجربة عند درجة حرارة عالية، واكتشفا في الرماد الناتج بلّورات كبيرة ذات تناظر بلوري خماسي (Fivefold Crystallographic symmetry).

إن البلّورات النانوية ذات التناظر الخماسي، أو العشرينية

الأوجه (Icosahedral)، شائعة جداً، لكن تلك البلّورات الكبيرة الميكرويّة المقاس ذات التناظر الخماسي نادرة في الطبيعة لأن مكوِّناتها الصغيرة لا تستطيع تكرار أنماطها بلا حدود لتكوين بُنى مالئة للفراغ. ومع نمو نوى هذه البلّورات، يزداد انفعالها، مؤدياً بها إلى العودة إلى بنيتها البلّورية الكبيرة الشائعة.

يقول أجايان إن البنية الطبيعية لكربيد البورون التي تحتوي على وحدات عشرينية الأوجه في الخلية الواحدة، تسمح للبلّورات بالنمو حتى مقاس ميكروي من دون انفعال. وتتصف هذه البلّورات بأنها فريدة بسبب تناظرها العالي، ونظراً إلى القساوة المتأصلة فيها، فيُتوقَّع أن تكون مادة هندسية جيدة، خصوصاً للطلاءات.

تصل بعض المعادن، ومنها بعض خلائط الألمنيوم، إلى حالة اللّدانة الفائقة حين تسخينها حتى درجات حرارة تصل إلى 982 مْ. وعند تلك النقطة، يمتط المعدن كاللّدائن، وهذا ما يمكِّن من قولبته ليصبح قطعة قوية ذات شكل معقد. لكن برغم أن هذه التقانة لاقت ترحيباً في الصناعة الجوية والفضائية، فإنها ما زالت غير مستعملة نسبياً من قبل منتجي السيارات والسلع الاستهلاكية. والمشكلة هي أن اللّدانة الفائقة تتطلب مدة طويلة لصنع القطعة، ودرجة حرارة عالية جداً لتشكيل بعض المكوِّنات. لكن الباحثين لدى جامعة كاليفورنيا يقولون إنهم تجاوزوا هذه العيوب بتحقيقهم لدانة فائقة عند درجة حرارة لا تزيد على 232 مْ. وهم يدَّعون أن تقانتهم تعمل مع طيف واسع من المواد، ومنها النيكل والسيراميك. ومفتاح ذلك، وفقاً لقول أستاذ علم المواد أميا مُخرجي (Amiya Mukherjee)، هو الانتقال من مواد مصنوعة من بلّورات ميكرويّة إلى مواد مصنوعة من بلّورات نانوية (تتراوح أقطار البلّورات الميكرويّة بين 1 و20 ميكروناً، أما البلّورات النانوية فهي أصغر منها بنحو 7000 مرة). ويُضيف مُخرجي

أن المواد النانوية البنية المصنَّعة أقوى كثيراً من تلك ذات البنية الميكرويّة[11].

## المواد النانوية البلّورات

باستخدام مجهر إلكتروني قوي لرؤية التفاصيل في المستوى الذري، اكتشف الباحثون لدى جامعة جون هوبكينز (Johns Hopkins) ظاهرة «توأمة» في صيغة للألمنيوم غير متبلورة، تشوَّهت تشوُّهاً لدناً في أثناء تجارب مخبرية. وسوف يساعد هذا الاكتشاف العلماء في التوقّع، على نحو أفضل، بالسلوك الميكانيكي لأنواع جديدة من المعادن التي تُصنع لأغراض خاصة، وبوثوقيتها.

في المستوى الميكروي، تتكوَّن معظم المعادن من بلُّورات، أو حُبيْبات، ضئيلة. لكن بالمعالجة المخبرية الدقيقة، بدأ العلماء في السنوات الأخيرة بإنتاج صيغ للمعادن نانوية البلُّورات، حُبيْباتها الإفرادية صغيرة جداً. وتُعدُّ هذه الصيغ النانوية البلُّورات عالية القيمة لأنها أقوى وأقسى من نظيراتها ذات الجودة التجارية. صحيحٌ أن إنتاجها بكميات كبيرة عالي التكلفة، إلا أنها يمكن أن تُستخدم لصنع مكوِّنات دقيقة لآلات ضئيلة من قبيل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة (MEMS)، أو حتى النظم التي هي أصغر، أي النظم الكهروميكانيكية النانوية (NEMS).

لكن قبل بناء تجهيزات من مواد نانوية، يحتاج المهندسون إلى فكرة أفضل عن الكيفية التي سوف تتصرف بها المعادن. مثلاً، ما هي الظروف التي سوف تنحني عندها أو تنكسر؟ لمعرفة ما يحصل لتلك المعادن تحت الإجهاد في المستوى الذرّي، أجرى الباحثون لدى جامعة جون هوبكينز تجارب على أغشية رقيقة من الألمنيوم النانوي البلّورات الذي تقل مقاسات حُبيباته بألف مرة عن مقاسات نظيراتها التجارية.

استُخدمت طريقتان لتشويه المادة النانوية أو إجبارها على تغيير شكلها. حيث استعملوا ثاقبة ذات رأس ألماسي لفتح ثقب ضئيل في قطعة من الغشاء، وسحقوا قطعة أخرى بدقها في جرن. ثم جرت معاينة حافة الثقب الفائقة الرقة والشظايا الناعمة الناجمة عن السحق تحت مجهر النفاذ الإلكتروني، وهذا ما مكَّن الباحثين من دراسة ما حصل للمادة في المستوي الذري. لقد وجدوا أن بعض صفوف الذرّات انزاحت لتكوِّن أنماطاً متعرّجة تُشابه منفاخ الأكّورديون. إن هذا النوع من إعادة الاصطفاف الذي يسمّى التوأمة التشويهية (Deformation Twinning)، يساعد على تفسير كيفية تشوّه المادة النانوية التي هي أقوى وأقسى من نظيرتها العادية، حين تعريضها لأحمال كبيرة.

يقول مايكل تشن (Michael Chen)، الباحث المشارك لدى جامعة جون هوبكينز في بالتيمور: «كان هذا اكتشافاً مهماً لأن التوأمة التشويهية لا تحصل في الألمنيوم الخشن الحُبيْبات. وباستخدام المحاكاة الحاسوبية، توقّع باحثون آخرون بأن التوأمة التشويهية سوف تُشاهد في الألمنيوم النانوي البلّورات». لقد اكتسب الباحثون، من خلال رؤية كيفية تشوّه المادة في المستوى الذري، فهماً أفضل لسبب عدم انحناء تلك المعادن وانكسارها بسهولة انحناء وانكسار المعادن التجارية نفسها. ويضيف تشن: «سوف يساعد هذا الاكتشاف على بناء نماذج جديدة للتوقّع بوثوقية أداء المواد النانوية الجديدة حين تعريضها للقوى الميكانيكية في التجهيزات العملية الواقعية».

وتمكَّن تشاو (Chow) من إنتاج خليطة نحاس ـ كوبالت نانوية البلّورات ذات شدة حقل لإزالة المغنطة (Magnetic Coercivities) تصل حتى 370 أورستد بإرجاع خلاَّت المعدن في كحول متعدّد الوظيفة (بوليول) (Polyol). توسِّع هذه الطريقة كثيراً مزايا سيرورة

البوليول التي طُوِّرت في فرنسا في أوائل ثمانينيات القرن العشرين لإنتاج مساحيق ميكرويّة المقاس للمعادن المختلفة. ووسَّع العمل اللاحق أيضاً هذه التقنية لتتضمّن تركيب مساحيق من دون ميكرويّة. وقد مكَّن هذا الفتح التقني الجديد من تكوين مواد ثنائية المعدن صغيرة جداً. وبضم جُسيْمات مغنطيسية منفصلة (حُبيْبات كوبالت نانوية) إلى حاضنة غير مغنطيسية (نحاس)، يأمل الباحثون في إنتاج مواد يمكن استخدامها في خزن البيانات مغنطيسياً بكثافات كبيرة.

ثمة مزايا أخرى في الطريقة الكيميائية لإنتاج بلّورات الكوبالت ـ نحاس النانوية. فهي تلغي شوائب البورون الموجودة في مواد مشابهة تُنتَج بالإرجاع المائي لهيدريد البورون من الأملاح المكوّنة له. وتمكّن التقنيات الكيميائية أيضاً الباحثين من سيطرة أفضل على تراكيب الجُسيْمات وحجومها وتوزُّعاتها. ويمكن أيضاً أن توفّر مقاومة جيدة للتكتل، إضافة إلى إمكان تصنيع تلك الجُسيْمات بكميات كبيرة وتكلفة مجدية اقتصادياً.

تُصنع المساحيق بتعليق خلاَّت الكوبالت (II) رباعية الماء مع خلاَّت النحاس (II) المائية في غليكول الإيثيلين. ويؤدّي التقطير المرتدّ للمزيج عند درجة حرارة 180 ـ 190 مْ مدة ساعتين إلى ترسيب جُسيْمات الكوبالت ـ نحاس لتكوين مسحوق يتألف من بلّورات نانوية متكتلة. ويبدو أن النحاس التكعيبي الممركز الوجه يتنوَّى أولاً ويعمل كقالب لتنمية كوبالت تكعيبي ممركز الوجه حرج الاستقرار. وقد زادت التطرية الحرارية لهذا المسحوق ذي نسبة الكوبالت المنخفضة من عتبة التشبع المغنطيسي وشدة حقل إزالة المغنطة القسري.

وأجرى يِنغ (Ying) وزملاؤه[14] دراسات للـ $CeO_{2-x}$ و$Al_2O_3$

وZnO باستخدام التحليل الطيفي تحت الأحمر القائم على تحويل فوريـيـه الـصـوتـي الـضـوئـي (Photoacoustic Fourier-Transform Infrared Spectroscopic) (PA-FTIR). وقد اهتموا بالأكاسيد النانوية البلّورات لأنها مواد جديدة ذات بلّورات تقل مقاساتها عن 10 نم، إضافة إلى أنها تتصف ببنى سطحية فريدة وبخواص تعتمد على المقاس ذات فائدة في تطبيقات التحفيز الكيميائي والسيراميك وأنصاف النواقل المتقدمة.

وأثناء التوصيف البنيوي السطحي للبلّورات النانوية للمواد $CeO_{2-x}$ و$Al_2O_3$ وZnO باستخدام التحليل الطيفي المذكور، استقصى الباحثون سمات بنيوية عدة تنفرد بها الأكاسيد النانوية البلّورات، هـي: فـراغـات الأُكـسـجـيـن (Oxygen Vacancies)، والـمـمـتـزات السطحية (Surface Adsorbates)، والفونونات السطحية (Surface Phonons)، وحـدود الـحُـبـيْـبـات والاحـتـواء الـكـمـومـي (Quantum Confinement). يمكن هندسة هذه السمات من خلال موسطات التركيب والمعالجة بغية تحقيق فهم أفضل واستخدام أنجع لخواص الأكاسيد النانوية البلّورات الفريدة. ووجدوا أيضاً أن العلاقات بين السطح والملتقى والبنية البلّورية الكبيرة والبنية الميكرويّة على درجة من الأهمية لتحقيق بنية ملائمة لتطبيقات المحفِّزات والسيراميكات والإلكترونيات والبصريات.

واستقصى تشياو (Xiao) وزملاؤه[15] التيتانيوم ـ ألمنيوم الذي يمكن أن يكون مادة إنشائية قوية خفيفة الوزن. رُكِّبت خليطة التيتانيوم ـ ألمنيوم النانوية البلّورات في ظروف متحكّم بها بالترذيذ والتكثيف ضمن غاز حامل من الأرغون، ثم الرصّ على البارد في الخلاء. وكانت النتيجة حُبيْبات مقاساتها بين 3 و35 نم، وكانت مقاسات أغلبها أقل من 10 نم.

استُقصيت بُنى الحُبيْبات الإفرادية وتركيبها الكيميائي باستخدام انعراج الأشعّة السينية، ومجهر نفاذ إلكتروني عادي، والتحليل الكيميائي الميكروي. ولم يُعثر على أطوار منتظمة متعدّدة المعادن، ووُجد أن أغلبية الحُبيْبات تتكوَّن من طَور سداسي غير منتظم تركيبه قريب من التيتانيوم ـ 55 في المئة ذ ألمنيوم.

وقام مازومدر[16] (Mazumder) وزملاؤه بأعمال بحثية تخص سيرورة التوضيع بالحت الليزري (Laser Ablation Deposition) للـ $NbAl_3$ بصيغتها النانوية البلّورات، إضافة إلى توصيف تلك السيرورة ونمذجتها. وأنتجوا مساحيق وأغشية ضمن مجال من ظروف المعالجة. وصنعوا أيضاً بُنى متعدّدة الطبقات من أغشية Al و$NbAl_3$ متناوبة. وتراوحت إنتاجية السيرورة بين 0.1 و0.3 مكروغرام لكل نبضة ليزر، ونجمت تفاوتات الإنتاجية هذه عن اختلاف حركية الغاز في ظروف المعالجة المختلفة. وتراوحت مقاسات جُسيْمات المسحوق الناتجة بين 5 و10 نم، وتزايدت المقاسات مع زيادة ضغط الغاز، وتناقصت مع زيادة استطاعة الليزر. وقاسوا أيضاً درجات الحرارة وسرعات التمدُّد بطرائق التشخيص الضوئية، ووجدوا أن سرعة التمدُّد المحوري مترابطة مع المقاس الوسطي للجُسيْمات.

واستقصى يِنغ[17] أيضاً الـ TiN الذي قد يكون مفيداً في التطبيقات الهندسية ذات المتطلبات الصارمة، وذلك بسبب قساوته ومقاومته للاهتراء. ونظراً إلى فاعلية التلبيد المنخفضة في المساحيق الميكرويّة البلّورات، استُخدمت الـ TiN بصورة رئيسة طلاء، لا بصفتها مادة سيراميكية صلبة. وشرح يِنغ باختصار تقنيات معالجة يمكن أن تُنتَج بها مواد TiN نانوية البنية جَسِيمة وكثيفة. فبإضافة تجهيزة تجميع ذات مرشّح صمّامي إلى مفاعل تدفّق قسري جديد يُستخدم لتركيب مسحوق TiN نانوي البلّورات، جرى تجميع ذلك المسحوق من دون تعريضه إلى الهواء. ومكَّنت إجراءات لاحقة

لتداول المسحوق بعناية من إنتاج TiN كثيف (99 في المئة) نانوي البنية (مقاسات الحُبيبات تساوي 250 نم) من خلال سيرورة تلبيد من دون ضغط عند درجة حرارة بلغت 1400 مْ.

وصُنِعت واختُبرت مكثفات كهربائية، تتكوَّن الطبقة العازلة الكهربائية الرئيسة فيها من الـ $BaTiO_3$ الملبّد النانوي البلّورات، وذلك في مسعى ناجح ومستمر لزيادة كثافة الطاقة التي تُخزن فيها وكمون انهيارها الكهربائي ومقاومة عزلها، لتصبح أفضل من تلك التي للمكثفات السابقة التي تحتوي على $BaTiO_3$ ملبد ذي حُبيْبات خشنة. ويقوم هذا التطوُّر على فرضية أن الخواص الفيزيائية لحُبيْبات الـ $BaTiO_3$ ذات الصلة بخصائص المكثفات تلك تتغيّر مع مقاساتها على نحو تكون فيه الحُبيبات الصغيرة أكثر ملاءمة لاستخدامها عازلاً في المكثفات.

**أما تلك التغيّرات، فيمكن تلخيصها بما يأتي:**

● **السعة وكثافة خزن الطاقة - (Capacitance and Energy Storage Density)**: لأسباب معقّدة يصعب شرحها في هذا المقام، يؤدّي الانتقال البطيء بين مجالي الاستقطاب الكهربائي في الـ $BaTiO_3$ إلى نقص في السعة، ومن ثَمَّ إلى نقص في كثافة خزن الطاقة التراكمية مع زيادة الكمون الكهربائي المطبق. وقد افتُرض أن هذا المفعول الضار للانتقال بين مجالي الاستقطاب الكهربائي يمكن أن يُجعل أصغري بتقليص مقاسات الحُبيْبات حتى مجال البلّورات النانوية (أصغر من 100 نم). بذلك يصبح من الممكن خزن مزيد من الطاقة، خصوصاً بالقرب من الحد الأعلى للكمون الذي تتحمله المكثفة.

● **كمون الانهيار وكثافة خزن الطاقة (Breakdown Potential and Energy Storage Density)**: يتعلق كمون انهيار الـ $BaTiO_3$، أو أي

مادة سيراميكية عازلة أخرى بقوتها الميكانيكية المتناسبة عكسياً تقريباً مع الجذر التربيعي لحجم أصغر عيب داخلي فيها. ونظراً إلى أن حجم العيب لا يمكن أن يكون أصغر من حجم الحُبيْبة، فإنه يُتوقع أن يزداد كمون الانهيار، ومقاومة الشدّ الميكانيكية، مع نقصان حجم الحُبيبْة. ويمكن لازدياد كمون الانهيار أن يؤدّي إلى زيادة السعة، ومن ثمَّ إلى زيادة كثافة خزن الطاقة.

• **مقاومة العزل الكهربائية (Insulation Resistance)**: تحدَّد مقاومة العزل في مكثفة كمياً بقياس التيار المستمر الذي يمر حين تطبيق كمون كهربائي ثابت بين طرفي المكثفة. ثمة نموذج كهربائي مبسط للمادة الحُبيْبية العازلة كهربائياً، يتمثل بوضع عناصر الحدود الحُبيْبية والحُبيبات الداخلية معاً على التسلسل. في المادة النانوية البلّورات العازلة كهربائياً (مقاس الحُبيْبة أصغر من 100 نم)، توجد حدود حُبيْبية مقاومة بطبيعتها في واحدة السماكة أكثر من تلك الموجودة في صيغة أخرى من المادة نفسها ذات حُبيْبات أخشن، ولذا يُتوقع أن تكون مقاومة العازل الكهربائية أكبر.

تمهيداً لاختبار هذه الخصائص، صُنعت مكثفات ذات عوازل متعدّد الطبقات مكوّنة من مادة ملبّدة نانوية البلّورات. وقد رُكِّبت المواد العازلة النانوية البلّورات لتكون متوافقة مع مِقْيَس وضعه اتحاد الصناعات الإلكترونية (Electronics Industries Association) (EIA)، يسمّى X7R، ويحدّد المجالات المقبولة لخواص العزل في المكثفات كتابع لدرجة الحرارة. تمتلك كل حُبيْبة $BaTiO_3$ متوافقة مع المقيَس المذكور بنية ميكرويّة مزدوجة مكوّنة من نواة كهربائية الاستقطاب، مشوبة إشابة خفيفة تحيط بها قوقعة شديدة الإشابة من مادة قابلة للاستقطاب كهربائياً (Paraelectric) (مواد الإشابة هي البيسموث والنيوبيوم والزنك والمنغنيز).

يُظهر الجدول 5 ـ 1 نتائج اختبارات مكثّفات مصنوعة من واحدة من صيغ الـ $BaTiO_3$ النانوية البلّورات، ومكثّفات متوافرة تجارياً مصنوعة من $BaTiO_3$ خشن الحُبيْبات. تشير هذه النتائج بوضوح إلى تفوق الـ $BaTiO_3$ النانوي البلّورات كعازل كهربائي. وعلى أساس هذه النتائج، وعلى مشاهدات أخرى حصلت في أثناء الاختبارات، يبدو أن المكثّفات المصنوعة من $BaTiO_3$ نانوي البلّورات يمكن أن تكون أعلى وثوقية عند درجات حرارة وجهود كهربائية أعلى، ويمكن أن تكون أصغر وأخف وزناً عند قيمة معيّنة للسعة، وأن تمتلك كثافة خزن طاقة أعلى، وسعة أكبر من أجل حجم محدَّد، مقارنة بالمكثّفات المصنوعة من $BaTiO_3$ خشن الحُبيْبات.

**الجدول 5 ـ 1**: جرى اختبار مكثفات $BaTiO_3$ نانوية البلّورات ومكثفات $BaTiO_3$ تجارية ووُجِد أن الأولى تتفوق على الثانية من حيث مقاومة العزل الكهربائية، وقيمة الحقل الكهربائي التي يحصل انهيار العازل عندها، وكثافة خزن الطاقة.

| الخاصية | **مكثفات $BaTiO_3$ نانوية البلّورات** | **مكثفات تجارية $BaTiO_3$ خشنة الحُبيبات** |
|---|---|---|
| مقاس الحُبيْبة | < 100 نم | 0.5 ميكرون |
| السماحية النسبية | 1.815 | 2.498 |
| مقاومة العازل عند كمون يساوي 200 فولت | | |
| ـ عند 25 مْ | 1.240 جيغا أوم | 0.132 جيغا أوم |
| ـ عند 200 مْ | 730 ميغا أوم | 138 ميغا أوم |
| انهيار العازل : الكمون/ السماكة | 863 فولت/ 8.75 ميكرون | 744 فولت/ 17.3 ميكرون |
| الحقل الكهربائي المكافئ للكمون/ السماكة | 98.6 فولت/ ميكرون | 43.0 فولت/ ميكرون |
| كثافة خزن الطاقة عند نصف كمون الانهيار الوسطي | 3.20 جول/ سم$^3$ | 1.86 جول/ سم$^3$ |

## المعالجة النانوية البلّورات

جرى في البداية استقصاء البنية الميكرويّة للمواد النانوية البلّورات من حيث النوع والبنية البلّورية، وعدد الأطوار وأشكالها وترتيباتها الطوبولوجية، والعيوب النقطية والانفصامات والأخطاء التراكمية والحدود الحُبيْبية، التي وصفها غلايتر[18] (Gleiter) جميعاً.

وكان غلايتر قد بيَّن سابقاً[19] أن المواد النانوية البلّورات هي مواد صلبة متعدّدة البلّورات ذات حُبيْبات تقل مقاساتها عن 100 نم، وأن للمسامات والملتقيات والعيوب الأخرى فيها أبعاداً مشابهة. وأن هذه البنية النانوية تؤدّي إلى مفاعيل كيميائية وفيزيائية ذات صلة بمقاسات الحُبيْبات. إن الطرائق الموجودة لتحضير كميات كبيرة من هذه المواد، وطرائق التحليل الجديدة (التي تقوم على مجهر المسح النفقي والمجهر الإلكتروني النفقي العالي الدقة)، إضافة إلى فكرة غلايتر الأصلية التي تقول إنه من خلال رصّ الجُسيْمات النانوية يمكن توقُّع تكوين مواد جديدة ذات بنية ميكرويّة وخواص لافتة، توفِّر جميعاً أساساً للمواد النانوية التي تمثل حقل بحث عريضاً توسَّع كثيراً خلال العقدين السابقين.

ليس تحضير المساحيق الناعمة جداً سوى الخطوة الأولى على طريق إنتاج المواد النانوية البلّورات. وبناءً على التطبيقات (أغشية نقل الشوارد في خلايا الوقود، والمُجِسَّات، والسيراميكات الإنشائية) يجب تحقيق بُنى ميكرويّة مختلفة. فالبُنى ذات المسامات النانوية، على سبيل المثال، مطلوبة في تطبيقات الترشيح الدقيق والامتزاز (Adsorption) والتحفيز الكيميائي. والبُنى ذات الحُبيْبات الشديدة النعومة في السيراميكات الكثيفة مرغوب فيها، لأن الحُبيْبات الصغرى تؤدّي، على سبيل المثال، إلى خواص ميكانيكية محسَّنة، وإلى لدانة

فائقة ضرورية لتكوين الشكل النهائي[20][24]. ويمكن أيضاً استخدام السيراميكات النانوية البلّورات بوصفها منتجات وسيطة تختفي فيها البنية النانوية بعد مراحل المعالجة النهائية آلَّن (Allen) وزملاؤه[25]. بغية استغلال هذه الخواص النانوية، ثمة حاجة إلى سيراميكات نانوية البلّورات (أصغر من 100 نم) عالية الكثافة (أكبر من 98 في المئة) ذات بنية ميكرويّة متجانسة. وفي معالجة السيراميكات المتقدمة، تُستخدم المساحيق الشديدة النعومة لتخفيض درجة حرارة التلبيد ومدته بغية الحصول على بنية ناعمة الحُبيْبة.

## التلبيد

يمكن تحضير المساحيق النانوية المقاس بتقنيات مختلفة، إلا أن التصليد لتكوين سيراميكات تامة الكثافة، من دون نمو ملحوظ في أحجام الحُبيْبات ما زال يمثل تحدياً. إن أكبر عامل محدِّد لتلبيد كثير من المساحيق الشديدة النعومة حتى كثافة تامة هو وجود التكتل (انظر يان[26] (Yan)). فالتكتلات تتصرف في أثناء الرصّ كالكينونات الكبيرة وتؤدّي إلى تغيّرات كبيرة في أحجام المسامات. وبسبب المعدّلات المختلفة لانغلاق المسامات في أثناء التكثيف، تتحوَّل المسامات الكبيرة إلى بنية ميكرويّة مسامية[27]. ولا يمكن التخلُّص من المسامات إلى عند درجات حرارة تلبيد عالية وفترات تلبيد طويلة، وهذا يؤدّي إلى نمو حُبيْبي مفرط. حين معالجة المواد العادية، تُستخدم دورات شيٍّ (Firing Cycle) مستمثلة أو طرائق الكبس الحراري، أو مواد إشابة لتعزيز التكاثف على حساب التلبيد[26][28]. وقد جرى تبيان أن هذه الطرائق تعمل أيضاً في حالة المواد النانوية البلّورات. على سبيل المثال، تؤدّي سيرورة تلبيد من خطوتين، مع الإشابة بالنيوبيوم، إلى تقليص حجم الحُبيْبة في أُكسيد الإيتريوم[30]. وكذلك يفعل الكبس الحار المتساوي الضغط HIP في

حالة الـ $TiO_2$ النانوي البلّورات[30]. وفي حالتي الـ $TiO_2$ و$Al_2O_3$[31] اللتين يُلبدان عند درجة حرارة منخفضة وضغط عالٍ، يتحدَّد ازدياد أحجام الجُبيْبات بالتحوُّل الطَوري المحرَّض بالضغط عند درجة حرارة منخفضة. إن التلبيد هو أكثر الخطوات أهمية في معالجة المسحوق، وهو الذي يحدِّد خواص المنتَج النهائي. يُضاف إلى ذلك أن لخصائص المسحوق الأولي تأثيراً كبيراً في قابلية المعالجة وفي البنية الميكرويّة للمنتَج النهائي (انظر الجدول 5 ـ 2).

وازداد الاهتمام بسيراميكات الزركونيا النانوية البلّورات، التي يقل مقاس الحُبيْبة فيها عن 100 نم، خلال السنوات القليلة الماضية لأن خواصها (قابلية التلبيد، الخواص الميكانيكية، واللّدانة الفائقة[33] غالباً ما تكون مختلفة إلى حد كبير وأفضل كثيراً من تلك التي لسيراميكات الزركونيا العادية الخشنة الحُبيْبات. وثمة كثير من الدراسات المعنية بالسيراميكات القائمة على الزركونيا التي تهتم بالمساحيق النانوية المُنتَجة بالطرائق الكيميائية المبلولة، ومنها ترسيب الهيدروكسيدات من الأملاح أو بحلمهة الألكوكسيدات ((Alkoxide Hydrolysis .

**الجدول 5 ـ 2: الخصائص المثالية لمساحيق تشكيل سيراميكات كثيفة نانوية البلّورات[26].**

| خصائص المسحوق | المفعول |
|---|---|
| مقاس جسيمي صغير | تلبيد منخفض الحرارة وقصير المدة |
| توزُّع أحجام ضيق | لا يوجد نمو حبيْبي شاذ، بنية ميكرويّة متجانسة |
| لا يوجد تكتل | |
| شكل جسيمي متساوي أطوال المحاور | كثافة نهائية عالية مع حجم حُبيْبي صغير، وبنية ميكرويّة متجانسة |
| نقاوة عالية، أو إشابة متحكّم بها | إعادة ترتيب سهلة للجُسيْمات، كثافة نهائية عالية |
| متجانسة التوزُّع | منع نمو الحُبيْبات |

ليست الطرائق الكيميائية الرطبة عالية التكلفة، وهي تمكِّن من إنتاج كميات كبيرة نسبياً من المسحوق. إلا أن أحد عيوبها هو أن

معظم المسحوق يكون فور التحضير غير متبلور، وهذا ما يتطلب تكليساً عند درجات حرارة تصل إلى 600 مْ قبل رصه، برغم أنه من المعروف أن تغيّرات بنيوية ميكروية (تغيّرات في توزُّع مقاسات المسامات وتجانس التكاثف) يمكن أن تبدأ بالحدوث عند درجة حرارة أدنى في السيراميكات النانوية البلّورة.

تتكوَّن المساحيق النانوية القائمة على الزركونيا، والمحضَّرة بسيرورات طَور غازي من قبيل التكثيف ضمن غاز خامل، من جُسيْمات متبلورة شديدة النعومة غير متكتلة أو ضعيفة التكتل تقل مقاساتها عن 20 نم[34][36]. لذا، فإن المساحيق المنتَجة بالتكثيف ضمن غاز خامل تتصف عادة بقابلية جيدة للتلبيد، مقارنة بمساحيق الزركونيا النانوية المحضرة بالكيمياء المبلولة. فثاني أُكسيد الزركونيوم $ZrO_2$ النانوي البلّورات المحضَّر بالتكثيف ضمن غاز خامل، يصل إلى الكثافة التامة عند مقاس حُبيْبي نهائي يساوي 60 نم بالتلبيد في الخلاء عند 975 مْ، في حين أنه يمكن الحصول على كثافة نسبية تزيد على 99 في المئة، عند مقاس حُبيْبي يساوي 45 نم، بالتلبيد المضغوط عند درجة حرارة تساوي 950 مْ وضغط يساوي 300 ميغا باسكال.

## تحضير الأبخرة كيميائياً

جرى إنتاج مساحيق نانوية البلّورات بتحضير البخار كيميائياً (Chemical Vapor Synthesis) (CVS) للزركونيا النقية، والزركونيا المشابة بالألومينا، والزركونيا المطلية بالألومينا[39][37]، والزركونيا المشابة بالإيتريا[40].

لا يتكتَّل مسحوق الزركونيا المحضَّر بطريقة تحضير البخار كيميائياً عندما يكون مقاس البُلَيْرة نحو 5 نم، ويكون ذا توزُّع ضيق للمقاسات وشديد التبلور. وحين الرصّ باتجاه واحد، يتكوَّن جسم طري شفاف ذو بنية ميكرويّة متجانسة شديدة النعومة، مع توزُّع ضيق

لمقاسات المسامات التي تقل أقطارها عن مقاس الحُبيْبة. ويتكوَّن سيراميك شفاف تام الكثافة من الزركونيا بمقاس حُبيْبي يساوي 60 نم بعد التلبيد في الخلاء عند 950 مْ مدة ساعة واحدة. وتكون درجة حرارة التلبيد والتكثيف أخفض حين التلبيد في الخلاء.

وجرى تحضير مساحيق زركونيا نانوية البلّورات مشوبة بنسبة مولية تساوي 3 حتى 30 في المئة من الألومينا بطريقة تحضير البخار كيميائياً. يعتمد التكوين الميكروي البنية للعينات المشوبة اعتماداً كبيراً على نسبة الألومينا. يُعطي تلبيد عيّنات الزركونيا المشوبة بنسبة مولية تساوي 3 و5 في المئة من $Al_2O_3$ عند درجة حرارة تساوي 1000 مْ مدة ساعة واحدة نوعين من السيراميك شفافين تامي الكثافة مقاساً حبيْباتهما يساويان 40 و45 نم، مع بنية ميكرويّة متجانسة.

إن الجُسيْمات الشديدة النعومة ذات توزُّع المقاسات الضيق والتكتل القليل المنتَجة بطريقة تحضير البخار كيميائياً للزركونيا ضرورية لإنتاج أجسام طرية ذات مسامات صغيرة ضيقة توزُّع المقاسات، وهذا بدوره متطلب لقابلية التلبيد الجيدة. أما نمو الحُبيْبات في أثناء تلبيد الزركونيا فيُمنع عملياً بالإشابة بالألومينا أو الإيتريا.

تمكّن سيرورة التحضير بالبخار كيميائياً من التحكُّم بتوزُّع العناصر في أثناء التحضير في المستوى الجُزَيئي. إن هذه السيرورة توفّر إمكان تصميم البنية الميكرويّة في السلّم النانوي وتوليف الخواص، ومنها قابلية التلبيد. ويمكن لاستخدام الطرائق المتقدمة للتحليل البنيوي أن يحدِّد تفاصيل الجُسيْمات الشديدة النعومة في المساحيق والمواد الملبّدة، وأن يوفّر معلومات لنماذج محسَّنة لسيرورة التحضير بالبخار كيميائياً وأن يؤدّي إلى طرائق معالجة مستمثلة ومنتجات نانوية البنية.

وقد بيَّن وينتَرَر[41] (Winterer) أن جودة المسحوق يمكن أن تكون عاملاً حاسماً لإنتاج «بنية ميكرويّة نانوية» معيّنة. وأن التحضير بالبخار كيميائياً يمكّن من التحكُّم بجودة المسحوق في المستوى

الجُزَيئي. إلا أن التوزيع المتجانس لمواد الإشابة يمثّل مشكلة، لأن عدد ذرّات مادة الإشابة في جُسيْم مقاسه 5 نم، أو أقل، يجب أن يُضبط بحيث لا يكون في الجُسيْم أكثر من بضع ذرّات. لكن الانفصال والترسُّب يحصلان في المستوى الجُزَيئي المحلي، وغالباً ما تكون ثمة ملوّثات وراء ذلك.

باختصار، جرى تطبيق النُهُج الأربعة التالية لإنتاج مواد نانوية البنية حتى الآن: **(1)** يتضمّن النهج الأول إجرائية من خطوتين هما: إنتاج بُلَيْرة نانومترية منعزلة ذات سطوح حرة نظيفة، تليه عملية تصليد (مع، أو من دون درجات حرارة مرتفعة). وقد اقتُرحت طرائق عدة لإنتاج البُلَيْرة النانومترية المنعزلة (من قبيل التكثيف ضمن غاز خامل، أو الترسيب من محلول، أو تفكيك مركَّبات أولية). وبناءً على تفاصيل سيرورة الإنتاج، يمكن للبُلَيْرة النانومترية الناتجة أن تكون متماثلة أو مختلفة كيميائياً، أو يمكن أن تُطلى عند سطوحها الحرة. وقد تحقَّق طلاء السطوح باستخدام توضيع الأبخرة فيزيائياً أو كيميائياً، أو بتعريض البُلَيْرات إلى جو تفاعلي عند سرعات فوق صوتية (Sonic Reactive Atmosphere) (أُكسجين). **(2)** ويتضمّن النهج الثاني إدخال عيوب بلورية عالية الكثافة (كالانفصام والحدود الحُبيْبية وغيرها) في مادة أحادية البلّورة كاملة (أو شبه كاملة) التبلور، وذلك بالتشويه الشديد (مثلاً بالطحن بالكرات أو البثق أو القص أو الاهتراء أو التعريض لإشعاع عالي الطاقة). **(3)** ويقوم النهج الثالث على التبلور من حالة غير مستقرة لمادة متكثفة. وقد استُخدمت في هذا النهج حتى الآن البَلْوَرة من زجاجيات، أو من صُهارات فائقة التبريد والترسيب ابتداءً من محاليل صلبة أو سائلة فائقة التشبّع (Supersaturated). **(4)** ويمكن صنع المواد النانوية البنية بترسيب الذرّات (الجُزَيئات) على ركائز ملائمة (بتوضيع البخار كيميائياً أو فيزيائياً، أو بطرائق كهروكيميائية، أو بتفاعلات الترسيب من محاليل ممدّدة). وإذا رُسِّبت

ذرّات (جُزَيئات) مختلفة كيميائياً في آن واحد، أو على التتالي، تتكوَّن مواد مركَّبة نانوية تنتمي إلى الطوائف الثانية والثالثة والرابعة (انظر الشكل 5 ـ 1). وقد طُوِّرت أنماط مختلفة من طرائق الإنتاج هذه في السنوات الأخيرة لتستغل الخصوصيات الكيميائية لبعض نظم الخلائط والعوامل الأخرى مثل قابلية التفاعل ومعدل الإنتاج والحجم الحُبيْبي. وفي الواقع، يُعتبر تطوير إجراءات الإنتاج المستمثلة تقانياً شديد الأهمية بالنسبة إلى التطبيقات التقانية للمواد النانوية البنية حينما يكون الإنتاج بكميات كبيرة، وتكلفة منخفضة هو المطلوب.

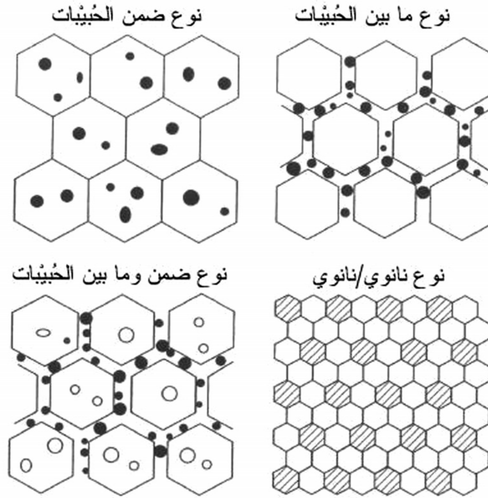
## المواد النانوية المركَّبة

ثمة طرائق كثيرة لصنع المواد السيراميكية والمعدنية الجديدة، وهي تعتمد على البنية النهائية المرغوب فيها، وعلى الشكل الجَسِيم الذي يجب تحقيقه. على سبيل المثال، يمكن استخدام كربيد السليكون مادة إنشائية صاقلة مقاومة للحرارة، أو نصف ناقل ذا مُعَامل درجة حرارة سالبة. والسيرورات التي طُوِّرت لإنتاج مثل هذه المواد شديدة التنوع والاختلاف، وتُنتقى السيرورة اعتماداً على الخواص المرغوب فيها وعلى الشكل الإنشائي للقطع المطلوبة. فمثلاً، جرى تكييف طريقة تحضير ألياف الكربون التي تحتاج إلى خامات أولية بوليمرية معيّنة لغزلها ثم معالَجتها حرارياً وأكسدتها، لتحضير ألياف كربيد السليكون. ومن السيرورات التي أتت من حقلي الفيزياء والكيمياء توضيع الأبخرة كيميائياً وتوضيع السائل كيميائياً. إن هاتين الطريقتين تمكِّنان من الحصول على خواص ميكانيكية أو حرارية أو كهربائية جيدة، ليس اعتماداً على تركيب كيميائي محدّد فقط، بل على ترتيب الأطوار البلّورية، أو على مقاسات الحُبيْبات. وتمثِّل المواد النانوية المركَّبة فئة جديدة من المواد الشديدة التنوُّع التي ظهرت خلال العقدين السابقين.

## السيراميكات

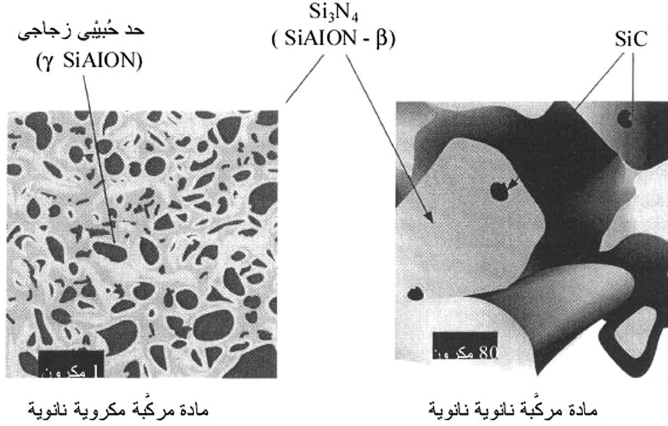
اقترح نييهارا (Niihara) وزملاؤه[47] وساجغاليك (Sajgalik) تصنيف السيراميكات في فئتين رئيستين:

● مواد مركَّبة ميكرويّة نانوية تتكوَّن فيها الحاضنة من بلّورات مكرومترية مضمَّنة في طَور نانومتري. ويمكن تجزئة المواد المركَّبة السيراميكية إلى نوعين: مواد مركَّبة ميكرويّة وأخرى نانوية. في المواد المركَّبة الميكرويّة، ينتشر طَور ثان ميكروي المقاس، من قبيل الجُسيْمات المنفصلة والصفيحات والشُعَيرات والألياف، عند حدود الحُبيْبات في الحاضنة. والغرض الرئيس من هذه المواد هو تحسين المتانة إزاء الكسر. من ناحية أخرى، يميز نييهارا وزملاؤه[47] ثلاث تشكيلات مختلفة للجُسيْمات: ضمن الحُبيْبات، وفي ما بين الحُبيْبات، وضمن وفي ما بين الحُبيْبات (انظر الشكل 5 ـ 5).




**الشكل 5 ـ 5: رسم توضيحي للمواد السيراميكية النانوية المركَّبة.**

• مواد مركَّبة نانوية/نانوية تنتشر فيها الحُبيْبات النانومترية للحاضنة والطَور الثاني انتشاراً متجانساً (انظر الشكل 5 ـ 6).




**الشكل 5 ـ 6: أشكال لمواد مركَّبة ميكروية ـ نانوية ونانوية ـ نانوية ذات حاضنة سيراميكية وتقوية سيراميكية.**

إن ما يجعل المركَّب النانوي على درجة من الأهمية هو أن واحداً من أطواره على الأقل له مقاسات في المجال النانومتري (10 ـ 100 نم). في هذا المجال، تصبح المفاعيل الكيميائية والفيزيائية ذات الصلة بالأبعاد حرجة، بمعنى أنه إذا جُعلت لَبِنات البناء النانوية أصغر من ذلك، فإن الخواص الجوهرية ذات الصلة يمكن أن تتغيّر. وأحد أمثلة ذلك هو تبعثر الضوء، حيث صُنعت سيراميكات شفافة للضوء المرئي بالتحكُّم في مقاسات المسامات والبلّورات النانوية في المجال 8 نم. وتم تحقيق خواص محسَّنة أخرى (لدانة فائقة، مقاومة مغنطيسية، تكثيف منخفض الحرارة، تجانس محسَّن وأنعم... إلخ).

وفي ما يخص المواد المركَّبة النانوية التي تنتشر الجُسيْمات النانوية المقاس فيها عموماً ضمن حُبيْبات الحاضنة، أو عند الحدود الحُبيْبية، فإن الغرض من الجُسيْمات الموجودة ضمن الحُبيْبات هو

الانفصام والتوليد والتثبيت في أثناء التبريد من حرارة التصنيع، أو التحكُّم بأحجام وأشكال حُبيْبات الحاضنة في أثناء التفاعل. إن الدور الأول للجُسيْمات النانوية مهم للسيراميكات الأُكسيدية، ومنها $Al_2O_3$ و$MgO$، التي تصبح لدنة عند درجات الحرارة المرتفعة، في حين أن الدور الثاني ذو أهمية للسيراميكات غير الأُكسيدية، ومنها $Si_3N_4$ و$SiC$ ذات الارتباط التشاركي (Covalent Bonding) القوي حتى عند درجات الحرارة العالية. ويجب أن تؤدّي الجُسيْمات النانوية في ما بين الحُبيْبات أدواراً مهمة في التحكُّم ببنية الحدود الحُبيْبية للـ $Si_3N_4$ و$SiC$ التي تحسِّن الخواص الميكانيكية عند درجات الحرارة العالية. بكلمات أخرى، الهدف من الجُسيْمات النانوية هو تحسين الخواص الميكانيكية عند كل من درجة حرارة الغرفة ودرجات الحرارة العالية. من ناحية أخرى، تتكوّن المواد المركَّبة النانوية/النانوية من جُسيْمات موزعة نانوية وحاضنة ذات حُبيْبات نانوية. والغرض الرئيس من هذه المواد هو إضافة وظائف جديدة إلى السيراميكات من قبل قابلية التشغيل واللدونة الفائقة الموجودة في المعادن.

واعتماداً على ميكانيك التكسُّر الخطي للمواد الهشة، وعلى البنية الميكرويّة والنانوية المبينة في الشكل 5 ـ 5، لن تحقِّق الجُسيْمات النانوية التي توجد ضمن وفي ما بين الحُبيْبات تحسُّناً كبيراً في المتانة تجاه الكسر، مع أن الخواص الميكانيكية الأخرى، ومنها القساوة ومقاومة الشدّ ومقاومة الزحف، يُتوقَّع أن تتحسَّن كثيراً بوجود تلك الجُسيْمات. لذا من الضروري الجمع بين المواد المركَّبة النانوية والميكرويّة بغية تصميم سيراميكات فائقة المتانة وفائقة القوة (أي مواد مركَّبة نانوية مقواة بجُسيْمات منفصلة، أو شُعيرات، أو صُفيحات، أو ألياف طويلة ميكرويّة المقاس).




**الشكل 5 ـ 7 سيرورات تصنيع المواد المركَّبة النانوية $Al_2O_3$/SiC، $Al_2O_3$/$Si_3N_4$، MgO/SiC** بطرائق التلبيد[47].

## التلبيد

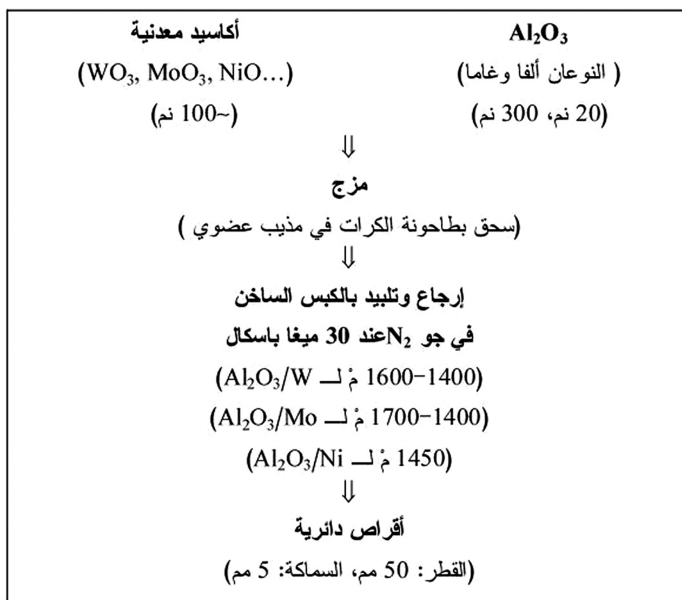
تُعتبر طرائق التلبيد واعدة جداً للسيراميكات الإنشائية. لقد جرى تحديد سيرورات التلبيد المثلى للمواد المركَّبة النانوية باستعمال مجهر النفاذ الإلكتروني TEM[48] لرصد المواد المركَّبة التي جرى تلبيدها عند ظروف مختلفة، وباستعمال مجهر نفاذ إلكتروني يعمل عند درجة حرارة عالية، وجهد كهربائي عالٍ لرصد سيرورات التلبيد في أثناء حصولها. وبناءً على ذلك جرى بنجاح تحضير مواد نانوية مركَّبة تقوم على السيراميكات باستخدام تقنيات تعدين المساحيق المعتادة، ومنها التلبيد العديم الضغط، والكبس الساخن، والكبس الحار

المتساوي الضغط للمنظومات $Al_2O_3/SiC$، $Al_2O_3/Si_3N_4$، $Al_2O_3/TiC$، $Y_2O_3/SiC$، $MgO/SiC$، Mullite/SiC، $B_4C/SiC$، $B_4C/TiB_2$، SiC/SiC غير متبلور، $Si_3N_4/SiC$. وجرى تحضير المواد المركَّبة النانوية $Si_3N_4/SiC$ بطريقة تلبيد الطَور السائل المطوَّرة لسيراميكات $Si_3N_4$ الكتلية، واستُخدم التلبيد في الحالة الصلبة للمنظومات الأخرى. يبيِّن الشكل 5 ـ 7 سيرورات تصنيع لمواد مركَّبة نانوية قائمة على الأكاسيد. وجرى تحضير المواد النانوية المركَّبة Mullite/SiC بالتلبيد التفاعلي العديم الضغط لمزائج مسحوق الـ Kaolin-$Al_2O_3$-SiC الطبيعية. وقد اختيرت مساحيق متوافرة تجارياً لصنع هذه المواد القائمة على الأكاسيد. أما المسحوق الأولي غير المتبلور Si-C-N فيتحول إلى المسحوقين النانويين $Si_3N_4$ وSiC بالمعالجة الحرارية عند درجة حرارة عالية في أثناء التلبيد(49). ومُزِج الـ $Y_2O_3$ بنسبة وزنية تساوي 8 في المئة مع المساحيق Si-C-N غير المتبلورة ذات النسب المختلفة من الكربون. في سيرورة التصنيع هذه، كانت المواد الابتدائية مختلفة عن تلك المستخدمة في سيرورة سيراميكات الـ $Si_3N_4$ الكتلية فقط.

وفي ما يخص منظومة السيراميك/ معدن، فقد حُضِّرت بنجاح المواد المركَّبة النانوية المكوَّنة من المسحوق النانوي $Al_2O_3$ والمحتوية على معدن بتلبيد مزائج مسحوق $Al_2O_3$ ومسحوق معدن، وبإرجاع وتلبيد مزائج $Al_2O_3$ وأكسيد معدني. ويبيّن الشكل 5 ـ 8 سيرورة تصنيع مواد نانوية مركَّبة معدنية تقوم على $Al_2O_3$، ومن أمثلتها $Al_2O_3$/W و$Al_2O_3$/Mo و$Al_2O_3$/Ti و$Al_2O_3$/Ni(50)(52).

وطوَّر أوشيدا (Uchida)، من شركة Mitsushita Electric، ونييهارا، الأستاذ في جامعة أوساكا باليابان(53)، مواد مركَّبة نانوية جديدة مكوّنة من جُسيْمات موليبدن نانوية شديدة النعومة، وُزِّعت توزيعاً متجانساً ضمن حاضنة من الإيثريا والزركونيا المثبّتة جزئياً. إن

إضافة جُسيْمات الموليبدن النانوية الميكرويّة الشديدة النعومة إلى حاضنة الإيثريا والزركونيا المثبّتة جزئياً القوية والمتينة نسبياً كوَّنت مادة مركَّبة ذات مقاومة ومتانة مكافئة لتلك التي للخلائط الفائقة القساوة، مع مقاومة للتآكل تساوي مقاومة السيراميكات تقريباً. وقد استخدمت شركة Matsushita Electric المادة المركَّبة الناتجة في حواف القَطْع في الأدوات الكهربائية وتجهيزات الحلاقة، ومنها آلات الحلاقة الكهربائية[53].




**الشكل 5 ـ 8: سيرورات تصنيع المواد المركَّبة النانوية سيراميك/معدن بطرائق الإرجاع والتلبيد[47].**

واختارت مجموعة البحث الوارد في المرجع 53 الموليبدن ليكون المكوِّن المعدني في المادة المركَّبة بسبب درجة حرارة

انصهاره العالية التي تصل إلى نحو 2600 مْ. في الخلائط الفائقة القساوة، تكون الخواص المعدنية، لا السيراميكية، هي السائدة، لأن المكوِّن المعدني فيها، وهو الكوبالت الذي ينصهر عند درجة حرارة منخفضة تساوي 1500 مْ، ينزع نحو تغطية حدود السيراميك الحُبيْبية. لذا، فإن الخلائط الفائقة القساوة تتميز بمتانة ممتازة، لكن مقاومتها للتآكل ضعيفة. باستخدام معدن ذي درجة حرارة انصهار عالية، تمكَّنت المجموعة من حل مشكلة مقاومة التآكل المنخفضة التي تمثِّل نقطة ضعف الخلائط الفائقة القساوة، وقد اختارت الموليبدن لأن مسحوقه الفائق النعومة القابل للتبليل عملياً متوفّر تجارياً.

لقد تأثرت الخواص الميكانيكية للمادة المركَّبة الجديدة كثيراً بمقدار الموليبدن المضاف. حيث ازدادت مقاومة الانحناء مع زيادة نسبة الموليبدن من 0 حتى 30 في المئةح، وبعدئذٍ لم تزدَد المقاومة ازدياداً ملحوظاً. من ناحية أخرى، لم تزدَد المتانة إلا قليلاً جداً إلى أن بلغت نسبة الموليبدن 30 في المئةح، ثم ازدادت بسرعة مع ازدياد تلك النسبة. وتفسير ذلك هو أنه «ما دامت نسبة الموليبدن أقل من 30 في المئةح، فإن الجُسيْمات النانوية هي التي تتحكَّم بمقاومة المادة المركَّبة للانحناء»[53].

وعندما تترسَّب الجُسيْمات النانوية ضمن جُسيْمات الزركونيا، تصبح بنية الزركونيا أنعم، وتزداد مقاومة المادة المركَّبة. من ناحية أخرى، ومع إضافة مزيد من الموليبدن، يبدأ الموليبدن الموجود في الحدود الحُبيْبية بالنمو ليتحوَّل إلى جُسيْمات من دون ميكرويّة المقاس، وهذا ما يؤدّي إلى متانة أكبر. تزداد متانة المادة لأن الموليبدن الموجود في الحدود يمنع تطوُّر أي تصدّعات تكون قد تولَّدت في أثناء التلبيد، وبسبب آلية التقوية الناجمة عن الانتقال الطَوري للزركونيا المثبّتة جزئياً.

جرى تحديد خواص المادة المركَّبة الميكانيكية، من أجل نسبة موليبدن حجمية تساوي 50 في المئة، وكانت النتائج كما يأتي: مقاومة الحَنِي تساوي 1800 ميغا باسكال، والمتانة تساوي 17.5 ميغا باسكال/م. إن هاتين القيمتين تساويان 1.8 و4.2 ضعف من قيمتيهما في حالة غياب الموليبدن. ووفقاً لما تقوله مجموعة البحث: «لم نرَ قط مادة مركَّبة نانوية تتصف في آن واحد بمقاومة انحناء تساوي 1000 ميغا باسكال وبمتانة تساوي 10 ميغا باسكال/م». وأكَّدت المجموعة مقاومة هذه المادة المركَّبة الممتازة للتآكل باختبار الرش بالماء المالح، واستنتجت من ذلك أن هذه المادة لن تواجه أي مشكلة في البيئة العادية[53].

## سيرورات أخرى

### التحطيم الحراري لمواد البوليمر الأولية في الحالة الصلبة

يُعدُّ التفكيك الحراري للبوليمرات، ومنها البولي سيلازان (Polysilazane) والبولي كربوسيلان (Polycarbosilane)، ضمن جو متحكَّم به سيرورة كفوءة لتحضير السيراميكات. فتبلور هذه المواد في أثناء التفاعل يمكِّن من تحضير مواد نانوية البلّورات بسيرورة خالية تماماً من المساحيق. وتعتمد بنية وتركيب الحدود الحُبيْبية التي تنشأ من سيرورات التبلور هذه بشدة على البنية الجُزَيئية للمواد الأولية المستخدمة في البداية. إن هذه السيرورات على درجة من الأهمية لتحضير الألياف، على وجه الخصوص.

## صنع المساحيق

للحصول على مواد مركَّبة نانوية، من الضروري تحضير مساحيق نانوية بغية زيادة تفاعل الأطوار المختلفة في أثناء سيرورة

التلبيد، لأن التفاعل يشتد مع ازدياد نسبة السطح إلى الحجم في المسحوق (أقطار الجُسيْمات أصغر من 100 نم عموماً). وللحصول على هذه المساحيق التي يجب أن تتصف بخصائص مثالية (مقاس نانومتري متساوٍ لجميع الجُسيْمات، شكل كروي، تكتُّل ضعيف، نقاوة عالية أو مسيطر عليها)، من الضروري تطوير سيرورات أخرى جديدة مبتكرة قابلة لتكييفها للإنتاج الصناعي.

**من السيرورات التي جرى تطويرها أخيراً سيرورات تتعامل مع تفاعلات من قبيل:**

- **تفاعلات الطَور الصلب (Solid Phase)**: تبخير ـ تكثيف، حت ليزري، سحق بطاحونة الكرات (أو خلط ميكانيكي)، تحضير عالي درجة الحرارة وذاتي الانتشار.

- **تفاعلات الطَور السائل (Liquid Phase)**: تحويل المحلول إلى هلام، تجفيف المحاليل بالبخ، تفتيت حراري للهباب[54].

- **تفاعلات الطَور الغازي (Gaseous Phase)**: تكثيف الأبخرة كيميائياً عند ضغوط منخفضة، تحضير بلازمي وتحضير ليزري[55][58].

### طاقة انفجارية

عرضت إدارة الذخائر لدى مختبرات بحوث القوى الجوية الأميركية[59] (Munitions Directorate of the U.S. Air Force Research Laboratory) (AFRL) في الآونة الأخيرة إمكان إنتاج مواد نانوية مركَّبة ذات أداء انفجاري جيد ويمكن تداولها بأمان. حيث صنع الباحثون لدى الإدارة مادة مركَّبة نانوية باستخدام طريقة تحضير جديدة تسمح بتشكيل جُسيْمات متكتلة عالية الطاقة تحتوي على وقود

من الألمنيوم النانوي المطلي ببلّورات نانوية شديدة الانفجار. إن هذا المفهوم (انظر الشكل 5 ـ 9) يمكِّن من المزج الوثيق للطلاء المتفجر المتفاعل، ونواة الوقود العالية الطاقة والكثافة، مستفيداً في ذلك من مسار التفاعل القصير.




**الشكل 5 ـ 9: مفهوم الجسيم النانوي المركَّب، وصورة حقيقية بالمجهر الإلكتروني لتجمُّع من الجُسيْمات النانوية المركَّبة.**

اتصفت تلك الجُسيْمات المتكتِّلة المتفجّرة بخواص أمان جيدة في أثناء اختبارات أمان التداول الأولية، وقد عُزي تحسُّن تلك الخواص مباشرة إلى خواص المقاومة المتأصلة في المكوِّنات النانوية المقاس. لقد جرى توصيف البُنى النانوية البلّورات في تلك المواد المركَّبة باستخدام مقياس انعراج الأشعّة السينية الخاص بالمساحيق، الذي يمكِّن من تقييم البُنى في سلم الأطوال النانوية. بتطبيق هذه التقنية التحليلية على المادة المركَّبة، يستطيع الباحثون فهم بنية المواد الموجودة فيها، والتحقُّق من خواصها بعد المعالجة.

أعطت الاختبارات الأولية لهذه المواد النانومترية نتائج مشجعة. حيث شوهدت زيادة في سرعة الانفجار وضغطه وفقاً لما جرى توقّعه لهذه المواد النانوية ذات مساحة السطح الكبيرة والأطوال القصيرة. وبيَّنت قياسات الحساسية للصدم انخفاضاً كبيراً جداً في الاستجابة للأحمال الصدمية العالية الضغط.

إن خاصية بطء تحرير الطاقة الناجمة عن استخدام منظومات حالة صلبة تحتوي على مؤكسد معدني عالي الطاقة أعاقت تاريخياً إمكان تحرير طاقة كبيرة بكثافة عالية. وبرغم أن تلك المنظومات تحتوي من الطاقة ما يصل إلى أربعة أضعاف ما تحتويه صيغ المتفجرات المعهودة، فإنه لم يمكن إلا أخيراً تحرير هذه الطاقة ضمن مدة زمنية مفيدة، وذلك بعد تطوير طرائق إنتاج جُسيْمات معدنية نانوية. لقد مكَّنت التقانة النانوية الباحثين من زيادة مساحات السطوح وتقصير أطوال مسارات تفاعلات هذه الجُسيْمات الصلبة بثلاث مراتب كِبَر. وهذه الزيادات تحسِّن كثيراً معدّلات التفاعل، وتضع منظومات الجُسيْمات الصلبة تلك ضمن طائفة المنظومات العالية الطاقة والكثافة التي تستطيع توليد قدرة تفجير كبيرة.

## البوليمرات والصلصالات

تَعِد المواد النانوية المركَّبة من البوليمرات والصلصالات بانفجار حقيقي في تطبيقات البوليمرات الحرارية التلدُّن لأنها مواد خفيفة الوزن تضاهي المعادن بجساءتها ومقاومتها مع توفيرها لخصائص جيدة من قبيل إعاقة تسرب الغازات، واستقرار الأبعاد الممتاز، ودرجة حرارة التشوُّه الحراري العالية، وكل ذلك بوجود نسبة صغيرة من الفلز وانعدام أي نقص في مقاومة الصدم عملياً[60]. إلا أنه ثمة مثلب حقيقي في هذه المواد هو غلاء وصعوبة نشر جُسيْمات الصلصال النانومترية السمكتيتية (Smectite) ضمن الحواضن اللّدائنية. وهذا ما أدَّى إلى تأخير انطلاق ثورة في مجال المواد، وإلى عدم استخدام تلك المواد النانوية المركَّبة حتى الآن إلا في بعض المنتجات الخاصة.

أما الآن، فإن طريقة تصنيع طوَّرتها أخيراً مختبرات آرغون

الوطنية الأميركية[60] يمكن أن تحقِّق تخفيضاً هائلاً في تكاليف تصنيع تلك المواد النانوية من خلال إلغاء مراحل عدة معالجة، وتجنب الحاجة إلى مادة الربط القوية في الملتقيات بين الحاضنة الراتنجية ومقوياتها، وهي مادة غالية في معظم الحالات.

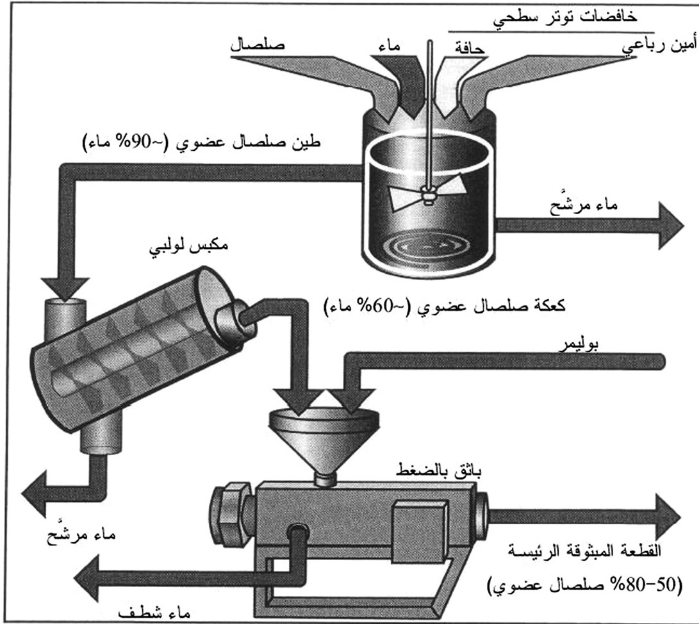
في التقانة الشائعة حالياً، مثَّل التوزيع المتجانس لجُسيْمات الصلصال النانوية في الحواضن البوليمرية مشكلة دائمة. فالصلصال السمكتيتي يتصف بمساحات سطحية كبيرة جداً (نحو 750 م$^2$/غ)، وهذا يعني أن سلوك الجُسيْم خاضع إلى التفاعل المعقّد بين القوى الكيميائية الفاعلة سطحياً. يُضاف إلى ذلك أن سطوح الصلصال السمكتيتية هي بطبيعتها أليفة للماء (Hydrophilic)، ويجب جعلها نفورة من الماء لتصبح متوافقة مع راتنجات الأوليفين.

يقوم أكثر السبل استخداماً لحل هذه المشكلة على تقانة عمرها 50 عاماً، وتعتمد على خافض توتر سطحي يسمح للصلصالات العضوية بالعمل كعوامل تحكّم بالانسياب في الدهانات القائمة على الزيوت والأحبار والشحوم. وأدّى الاعتماد على هذه العوامل إلى رفع تكاليف التصنيع كثيراً، وأثّر سلبياً في المقاومة الكيميائية وخصائص منع تسرُّب الغازات وخواص المنتج النهائي الأخرى.

تبدأ طريقة التصنيع التي طوَّرتها مختبرات آرغون بنشر جُسيْمات الصلصال في الماء ثم مزجها مع خافض توتر سطحي (انظر الشكل 5 ـ 10). وبعد تصريف الماء، يُرشَّح طين الصلصال العضوي المعالج سطحياً بواسطة مكبس ترشيح عالي الضغط لتخفيض المحتوى المائي في الكعكة الناتجة إلى نحو 40 ـ 60 في المئة.

يتكوَّن كل جُسيْم صلصال عضوي من كُدسة من الصفيحات الصلصالية. وتكمن الصعوبة الأساسية في صنع مادة مركَّبة نانوية في

فصل صفيحات الصلصال بعضاً عن بعض إلى درجة تسمح لجُزَيئات البوليمر بالتغلغل في ما بينها. يقال عن جُسيْمات الصلصال التي يتحقّق هذا فيها بأنها «مقشَّرة». وتبتدئ الخطوة التالية سيرورة التقشير بمزج كعكة الصلصال العضوي مع البوليمر ضمن باثقة (Extruder) مضغوطة لا يُستخدم فيها أي عامل قرن مهما كان نوعه.




**الشكل 5 ـ 10: تتضمن سيرورة مختبرات أرغون الوطنية كيمياء خافضات توتر سطحي متخصِّصة تمكِّن من تخليص الصلصال العضوي من الماء بعملية شطف، وفي الوقت نفسه من تحضير مركَّز من مادة مركَّبة[61].**

ويُخرج الماء المتبقّي من كعكة المرشِّح ويُزال من الباثقة بحالته السائلة، وبذلك تنتفي الحاجة إلى تكبُّد تكاليف التسخين لتبخيره. تحلُّ هذه الخطوة محلَّ مرحلتي التجفيف والطحن الشديدتي استهلاك الطاقة في طرائق التصنيع المعتادة. أما قطعة المادة المركَّبة النانوية

الناتجة فهي مادة تغلغلت فيها جُزَيئات البوليمر في ما بين الصفيحات (إلا أن صفيحاتها ليست تامة التقشُّر)، وتحتوي على صلصال عضوي تتراوح نسبته بين 50 و80 في المئة. وهي ليست تامة التقشُّر بسبب نسبة الصلصال العالية، إلا أنها جُعلت جاهزة للاستخدام بتضمين جُسيْمات البوليمر في ما بين صفيحات الصلصال.

جُسيْمات البوليمر تلك هي مفتاح السيرورة. عادة، تتغلغل جُسيْمات البوليمر ببطء شديد من خلال مرحلة تحكّم بالمعدل تعمل على تحقيق موطئ قدم لدخول البوليمر. إلا أن السيرورة الجديدة تسمح بتنفيذ هذه الخطوة الأولى بسرعة كبيرة، معطية مادة مركَّبة على شكل كرات صغيرة عالية التركيز وجيدة تغلغل البوليمر ومجدية التكلفة.

يمكن بعدئذٍ إنتاج مادة تامة التقشُّر بمزج الكريَّات الناتجة مع بوليمر ملائم ضمن باثقة عادية، أو ضمن مازج من النوع بانبَري (Banbury). ويمكن تداول مركَّز الصلصال العضوي بالطريقة نفسها التي تُتداول بها مركَّزات الأصبغة اليوم في تقانة معالجة اللّدائن الشائعة.

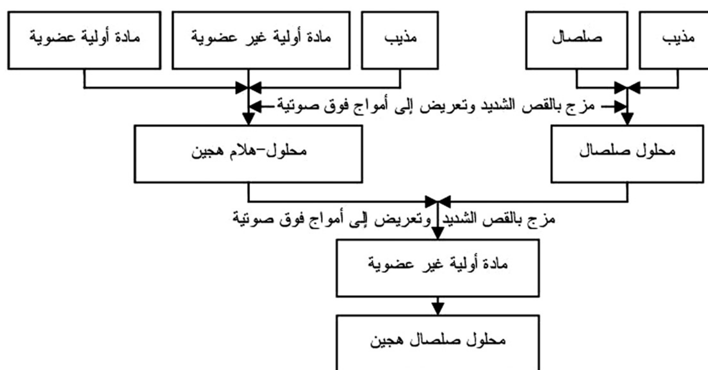
جرى نشر جُسيْمات صلصال نانوية شفافة في بوليمرات مختلفة حرارية التلدُّن، من قبيل البولي إيثيلين (Polyethylene) والبولي بروبيلين (Polypropylene) وبوليمرات الإيثيلين ـ بروبيلين المشتركة، وفي مطاطيات البولي إيزوبرين (Polyisoprene) والبولي بوتادين (Polybutadiene). أما طريقة الشطف المستخدمة في السيرورة فهي ملائمة أيضاً للمواد المنخفضة الوزن الجُزَيئي، ومنها الأوليغومرات (Oligomers) والملدِّنات (Plasticizer) والمونومرات (Monomers).

تركَّز معظم البحث لدى مختبرات آرغون الوطنية في المواد المركَّبة النانوية بوليمر/صلصال القائمة على البولي أوليفينات

(Polyolefins) والـمـطّـاطـيـات. أمـا الـبـولـيـمـرات الـفـلـوريـنـيـة (Fluoropolymes) فلم تُعطَ إلا قليلاً من الاهتمام برغم وجود بعض الاهتمامات التجارية بها. ويمكن استخدام هذه السيرورة مع البوليمرات الحرارية التصليد أيضاً، إلا أن إحدى المشكلات التي تواجهها هي أن خافضات التوتر السطحي الصلصالية العضوية المعدَّة لتسهيل التقشُّر في المونومرات قد لا تكون ملائمة للمادة المبلمرة. أما في ما يخص راتنجات الإيبوكسي، فهذا لا يمثل مشكلة. فقد استُخدمت سيرورة الصلصال العضوي تلك بنجاح مع أوليغومرات الإيبوكسي التي تمثل أساس راتنجات الإيبوكسي[61].

وفي برنامج تطوير حديث لدى وكالة الفضاء الأميركية[62]، ابتُكرت فئة جديدة من المواد المركَّبة النانوية بوليمر/ صلصال في محاولة لتطوير مواد شفافة خفيفة الوزن ومديدة العمر لتطبيقات فضائية وجوية مختلفة. تتكوَّن هذه المواد المركَّبة من حاضنات بوليمرية هجينة، عضوية/ غير عضوية، تحتوي على جُسيْمات صلصالية صفيحية الشكل سماكاتها بضعة النانومترات وأطوالها مئات عدة من النانومترات. ونظراً إلى نسبها البعدية العالية ومساحات سطوحها الكبيرة، فإنها، إذا نُشرت نشراً ملائماً في الحاضنة البوليمرية بنسبة 1 حتى 5 في المئة و، أدّت جزئياً إلى تشكيلة فريدة من الخواص الفيزيائية والكيميائية تجعل هذه المواد النانوية مغرية لصنع أغشية وطلاءات لكثير من التطبيقات الصناعية المختلفة. ومقارنة بالبوليمر غير المعدَّل، فإن المواد المركبة بوليمر/ صلصال النانوية يمكن أن تؤدّي إلى تحسينات في مقاومة الشدّ ومُعَامل يونغ والمتانة، وزيادة مقاومة التمزق والإشعاع والنار، وخفض مُعَامل التمدّد الحراري، وإنقاص النفوذية الغازية، مع الاحتفاظ بدرجة عالية من الشفافية الضوئية.

تتكوَّن جُسيْمات الصلصال، موضع الاهتمام، في الطبيعة من سليكات طبقية. وبهدف استغلال مزايا المواد المركَّبة بوليمر/صلصال النانوية استغلالاً تاماً، من الضروري أن تصبح جُسيْمات الصلصال تلك تامة التقشُّر (متفرقة الصفيحات)، ومتجانسة الانتشار في الحاضنة البوليمرية. وإلى جانب ذلك، من الضروري الحفاظ على تفرُّق الصفيحات، وذلك بمجابهة نزعة لدى جُسيْمات الصلصال الموزَّعة المقشرة، لوحظت في تراكيب سابقة لمواد البوليمر/صلصال، نحو العودة إلى طبقات مكدسة في أثناء المعالجة الحرارية. يكمن أحد أسباب صعوبة تحقيق التقشير والانتشار المتجانس والحفاظ عليهما في عدم التوافق بين سطوح جُسيْمات السليكات (الأليفة للماء) والحاضنة البوليمرية (النفورة من الماء).




**الشكل 5 ـ 11: يبيّن هذا المخطط الانسيابي الخطوات الرئيسة لسيرورة صنع غشاء من مادة نانوية مركَّبة من بوليمر هجين عضوي/غير عضوي وصلصال[62].**

يُبيّن الشكل 5 ـ 11 سيرورة لصنع غشاء من مادة مركَّبة نانوية بوليمر/صلصال تعمل وفقاً لاختراع مختبرات آرغون الوطنية. في أحد فرعي **الخطوة الأولى**، يُحضَّر راتنج حاضنة هجين عضوي ولاعضوي بصيغة محلول ـ هلام. وتتكوَّن المادة الأولية العضوية من

الهجين من مركَّب أو أوليغومر يحتوي على مجموعة وظيفية قابلة للتشبيك (فينيل إيثينيل (Phenylethynyl) مثلاً)، ومجموعة ألكوكسي سيلان (Alkoxysilane). أما المادة الأولية اللاعضوية في الحاضنة الهجينة فهو أيضاً ألكوكسي سيلان. تُمزج المادتان الأوليتان مع مذيب لتكوين حاضنة محلول ـ هلام راتنجية. وفي الفرع الآخر من الخطوة الأولى، يُحضَّر محلول صلصالي بنشر جُسيْمات صلصال طبقية في مذيب مماثل لذاك الذي استُخدم في الحاضنة الراتنجية. ولتحقيق تغلغل المذيب في الطبقات المتكدسة، يُعرَّض المزيج إلى عملية مزج بالقص الشديد وإلى أمواج فوق صوتية. من الصلصالات المتوافقة مع البوليمر العضوي صلصالات معدّلة كيميائياً من النوع السمكتيتي الأليف للعضويات التي تتبادل الشوارد الموجبة وكذلك الصلصالات التركيبية التي تضم مجموعات هدروكسيل وظيفية على حواف أو سطوح جُسيْماتها.

وفي **الخطوة الثانية** من السيرورة، يُضاف محلول الصلصال إلى محلول الحاضنة الهجينة، ويُعرَّض المزيج الناتج إلى مزج بالقص الشديد وإلى أمواج فوق صوتية. وتتفاعل مجموعات الهيدروكسيل في الهجين العضوي/اللاعضوي مع مجموعات الهيدروكسيل التي على حواف وسطوح جُسيْمات الصلصال المقشرة، مكوّنة روابط تشاركية أو هيدروجينية تحسِّن التقشُّر بوجود القص شديد.

وتتضمّن **الخطوة الثالثة** سيرورة صب الغشاء. على سبيل المثال، لصنع غشاء غير موجَّه، تكون البداية بسكب المحلول على لوح زجاجي، أو على أي سطح مناسب نظيف آخر. ويُترك المحلول حتى يجف ويكوِّن غشاء عديم التثبيت في الهواء الجاف، ثم يُعرَّض إلى مزيد من التجفيف والشَيّ بواسطة تيار من الهواء الساخن. وفي أثناء هذه المعالجة الحرارية، تخضع مجموعات السيلانول المتبقّية

من الهجين إلى تفاعلات تكثيف لتكوِّن شبكة جُزَيئية تمنع إعادة اتحاد الجُسيْمات المقشرة في طبقات مكدسة. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن تصليد الحاضنة العضوية بصنع مزيد من الروابط بين المجموعات الوظيفية القابلة للتشبيك في أثناء الشَيّ. وقد يكون من الممكن تحضير أغشية وألياف موجهة باستخدام القص والسحب وغزل الألياف.

**البوليمر/ سليكا**

ثمة حاجة إلى مواد شفافة ضوئياً لأغراض تعليب المكوّنات والنسائق البصرية. ومن الخواص المهمة المطلوبة في مواد التعليب تلك قرينة انكسار يمكن التحكُّم بها، وتقلُّص قليل عند الشيّ، وعامل تمدّد حراري متوافق مع ذاك الذي للمكوّنات البصرية.

إلا أن مواد التعليب الضوئية البوليمرية العادية تميل إلى التقلُّص الشديد وامتلاك عامل تمدّد حراري كبير، وهذا ما يحد من تطبيقاتها. إحدى طرائق تخفيض عامل التمدّد الحراري وتقليل المشاكل الناجمة عنه هي إضافة جُسيْمات زجاجية إلى البوليمر. إلا أن إضافة الحشوة الزجاجية تؤدّي عادة إلى فقدان النفاذية الضوئية نتيجة الاختلاف بين قرينة انكسار الجُسيْم وقرينة انكسار الحاضنة الإيبوكسية. لكن ثمة باحثون يقولون إنه عندما يُقلَّص الفارق بين قيمتي قرينة الانكسار إلى $10^{-3}$، فإنه يمكن تحقيق الشفافية الضوئية[63][65].

وفي الآونة الأخيرة، استُخدمت جُسيْمات سليكا نانومترية بدلاً من الجُسيْمات الميكرويّة المعتادة[66]. واقترح شي (Shi) وزهاو (Zhou) وإدواردز[67] (Edwards) نوعاً جديداً من المادة المركَّبة النانوية البصرية للتعليب الضوئي وتطبيقات التجهيزات البصرية. وقد حُدِّد عامل التمدّد الحراري والناقلية الضوئية لهذه المادة النانوية البصرية كتابع لنسبة الحشوة.

تكوَّنت الحاضنة في تلك المادة المركَّبة النانوية من منظومة راتنج ـ إيبوكسي. وكان الراتنج الذي استُخدم في التجارب إيثر بيسفينول ثنائي الغليسيدال (Diglycidal Ether of Bisphenol) من النوع الصافي. وكان المقسِّي بلا ماء الفتاليك السداسي الهيدروجين (Hexahydrophthalic Anhydride). واستُخدم ملح أمين ثلاثي (Tertiary Amine) محفِّزاً للتفاعل. واتصفت حشوة السليكا النانومترية بتوزع ضيق لمقاسات الجُسيْمات، وكان أكثر المقاسات احتمالاً هو الـ 25 نم تقريباً. وكان أكبر مقاس للجُسيْمات 50 نم. وقد نُشرت الجُسيْمات النانوية ضمن الإيثر بيسفينول ثنائي الغليسيدال.

حُضِّرت المادة بمزج راتنج الإيبوكسي والسليكا النانومترية التي سبق أن شُتّت، وأضيف إلى المزيج كمية ستوكيومترية (وفق الأمثال التفاعلية) من مقسٍّ ومحفِّز. وجرى تخليص المادة المركَّبة الناتجة من الهواء وتجميدها عند ـ 40 ْم حتى يحين موعد استخدامها.

حينما وُضعت عيّنات من تلك المادة المركَّبة فوق أحرف مطبوعة على ورقة، كانت الأحرف مقروءة، وهذا يدل على أنها تنقل الضوء جيداً في مجال الضوء المرئي. ولتحديد النفاذية الضوئية في المجال بين 300 و 900 نم، استُخدم مقياس الطيف الضوئي. إن إضافة الحشوة تخفِّض عموماً نفاذية الضوء، إلا أن مقدار التخفيض تابع لطول موجة الضوء. وقد أدت إضافة الحشوة هنا إلى انخفاض أشدّ في النفاذية الضوئية عند الموجات القصيرة.

تنخفض النفاذية الطيفية في المواد النانوية المركَّبة، بوصفها تابعاً لنسبة الحشوة، بميل أشدّ عند أطوال الموجات التي هي أقصر. وعندما يصبح طول الموجة أكبر، يصبح حجم جُسيْم الحشوة أصغر كثيراً من طول الموجة، مؤدّياً إلى انخفاض أقل في النفاذية الضوئية. إلا أن ثمة اكتشافاً تجريبياً مثيراً آخر جديراً بالذكر: بعد تجاوُز نسبة الحشوة 10 في المئة، لم يُلاحظ انخفاض إضافي في النفاذية الضوئية.

تُعتبر إضافة حشوة من السليكا النانوية إلى حاضنة إيبوكسية طريقة عملية لتصنيع مواد نانوية مركَّبة بصرية لأغراض التعليب، خصوصاً بعد اكتشاف أن زيادة نسبة الحشوة إلى ما فوق 10 في المئة و لا يؤدّي إلى مزيدٍ من انخفاض الناقلية الضوئية. وثمة الكثير من الفرص في هذا المجال، من قبيل تحضير الجُسيْمات النانوية في أثناء التفاعل[68][69].

## الصفائح

قام حسيب (Haseeb) وسيليز (Celis) وروس[70] (Roos) بتصميم وتطوير وبناء مجموعة كهروكيميائية مؤتمة لتوضيع المواد النانوية المركَّبة التي تتكوَّن من طبقات متناوبة رقيقة جداً، سماكاتها بضعة نانومترات. واستخدموا في المجموعة خليتين كهروكيميائيتين تعملان بالنفث الكهروليتي الصدمي، الذي حقَّق نقلاً متجانساً للكتلة إلى الركيزة في أثناء التوضيع. وتجنّبوا في هذه المجموعة التلوث المتبادل للأحواض باستخدام ستارة غازية مبتكرة مع شطف متوسط. وباستخدام هذه المجموعة، جرى توضيع مواد نانوية مركَّبة من النحاس/نيكل ذات صفائح سماكة كل منها تساوي 25 نم. وبيَّنت الدراسة الإنشائية للمادة الناتجة وجود طبقات متميزة لها سماكات متجانسة. ولم يؤدِّ تعريض الركيزة إلى الهواء المضغوط في نظام الستارة الغازية إلى تمزُّق في البنية الشكلية وفق ما تبيَّن بمجهر المسح الإلكتروني.

## البثق

كُلِّف باول (Powell)، لدى وكالة الفضاء الأميركية[71]، بمهمة تطوير بعض المواد المركَّبة التي سوف تُستخدم في مهمة الدوران

حول تيتان (Titan Orbiter Aerorover Mission). وكان الغرض من البحث هو الاستعاضة عن إيبوكسي الغرافيت بمادة شديدة المرونة وخفيفة الوزن جداً، ولها قوة الفولاذ تقريباً، وتعمل كحجاب للإشعاعات الكونية والكهرومغنطيسية. واستُخدمت في هذا البحث أنابيب كربون نانوية موجهة وُضعت على ركيزة بوليمرية، وشُبِّكت الأنابيب معاً كيميائياً بواسطة الركيزة.

اتصفت المادة الناتجة بمقاومة للشدّ كتلك التي لأنابيب الكربون النانوية مع ناقلية حرارية وكهربائية جيدتين. وتحقّق تقليص وزني ملحوظ لواحدة المقاومة، مع مرونة إضافية ليست موجودة حالياً في إيبوكسي الغرافيت.

«إن هذه التقانة التمكينية صالحة لكل شيء، من واقي السيارة من الصدمات حتى مظلات الهبوط الجوي والمقدّمات الكبيرة في الطائرات. إنها مادة أساسية قوية ومرنة وخفيفة الوزن جداً،» وفق قول باول.

حصل أول استخدام مفيد للتقانة النانوية في الفضاء في مرقاب هابل الفضائي (Hubble Space Telescope). وكان ذلك بوضع واجهة حرارية محسَّنة على مطياف التصوير الذي كان واحداً من أربعة أجهزة قياس في المرقاب، وفقاً لقول باول. إن ما كانت تحتاج إليه تلك المهمة هو تبديد كمية من الحرارة تزيد عما يسمح به مشعّ التبريد الموجود في مطياف التصوير، لكن المهندسين لم يستطيعوا تأمين تماس جيد مع الجهاز، ولم يستطيعوا أيضاً إضافة أي عتاد يمكن أن يحقِّق تماساً جيداً معه.

وقرر باول، مرة أخرى، استخدام أنابيب الكربون النانوية، موجِّهاً إياها ضمن صفيفة منتظمة، على نحو مشابه لشعرات فرشاة

الأسنان المنتصبة عمودياً والمتراصة معاً. وهذا ما مكَّن من زيادة مساحة التماس الحراري الصافية مع المشع الموجود، وذلك بضغط أنابيب الكربون النانوية ضمن العيوب السطحية للمشع الموجود، أي الشقوق الصغيرة والوصلات والتقعرات الميكرويّة العمق، وهذا ما يقلِّل مساحة السطح الحراري غير المتماس الصافية. إن الأمر مشابه لضغط فرشاة الأسنان على سطح جصّي، حيث يحصل التماس في أماكن أكثر مما يمكن تحقيقه بصفيحة مستوية.

## التصنيع النانوي

على غرار الكثير مما يحمل الصفة النانوية، فإن التصنيع النانوي، المعروف أيضاً بالتشغيل النانوي، أو بإعداد النماذج الأولية النانوية، قد وسَّع حدود ما اعتبرته صناعة الليزر عادةً معالجة المواد. في هذه السيرورة، ثمة بعض التطبيقات التجارية الأولية الحقيقية لليزرات والبصريات في عالم المقاسات النانوية[72].

تُعتبر المعالجة الليزرية تقنية راسخة في التشغيل الميكروي وتحضير الأغشية الرقيقة وتنفيذ النماذج الأولية للتجهيزات الميكرويّة، وهي تنطوي أيضاً على إمكانات فريدة لتحضير المواد ومعالجتها في المجال النانوي. ومعظم ما تحقَّق حتى الآن في التصنيع النانوي (عند مقاسات أصغر من 100 نم) هو نقل سيرورات حالية من قبيل الطباعة الضوئية، أو مفاهيم من قبيل التلبيد الليزري، إلى مجالات جديدة من التطبيقات في الإلكترونيات الميكرويّة والاتصالات الضوئية ولواقط الطاقة الشمسية وخزن البيانات ضوئياً والسوائليات الحيوية وصناعة أنصاف النواقل.

في الواقع، يجب نقل مفاهيم الطباعة الضوئية الأساسية

المستخدمة في تصنيع أنصاف النواقل إلى التصنيع النانوي، خصوصاً مع هذا الاندفاع اللامحدود نحو إيجاد أشكال متزايدة الصغر من رقاقات أنصاف النواقل والدارات المتكاملة.

عملياً، هذا الانتقال قائم فعلاً. ففي نهاية تسعينيات القرن العشرين، كانت ثمة تقارير عن الطباعة الضوئية النانوية ورسم الأشكال النانوية بواسطة الأشعّة الليزرية الدقيقة المحسَّنة. فبضم المعالجة الليزرية إلى التكبير بمجهر المسبر الماسح (Scanning-Probe Microscopy)، تمكَّن الباحثون من حفر خطوط بعرض وصل بصغره إلى 30 نم.

وحالياً، «يتركز الاهتمام في توليد الأشكال من خلال نقل طرائق الطباعة الضوئية الحالية إلى السلّمين الميكروي والنانوي باستخدام ليزرات الإضاءة المديدة، ومن أمثلتها ليزر الأشعّة فوق البنفسجية التي يمكن أن تكون مفيدة في رسم الأشكال بالتوازي لأقنعة كاملة في الوقت نفسه»، هذا ما قاله هاريس دومانيديس (Haris Doumanidis)، مدير برنامج التصنيع النانوي التابع لمؤسسة العلوم الوطنية (National Science Foundation). ويتابع قائلاً: «تُستخدم تطبيقات الليزرات ومصادر الطاقة عموماً في تكوين أشكال ثنائية الأبعاد ذات وظائف معيّنة، إلا أن هذه السيرورة نفسها يمكن أن تطوَّر لتصبح ثلاثية الأبعاد من خلال تعدّد الطبقات».

لقد شقَّت تقنيات الطباعة الضوئية النانوية طريقها فعلاً إلى القطاع التجاري. فالمهندسون، مثلاً، يستخدمون تقنيات تصنيع قائمة على رقاقة نصف ناقلة لصنع فئة جديدة من المكوّنات البصرية: البصريات النانوية التي تتصف ببنى فيزيائية أصغر كثيراً (أصغر من 250 نم) من طول موجة الضوء المستخدم لصنعها.

تتفاعل البُنى السطحية الدقيقة للبصريات النانوية مع الضوء وفقاً لمبادئ فيزيائية جديدة، معطيةً تراتيب جديدة لوظائف المعالجة البصرية مع كثافة أعلى وأداء أشدّ مناعة. يضاف إلى ذلك أن الأبعاد الصغيرة للبصريات النانوية تسمح بالتكامل المتعدّد الطبقات الذي يمكِّن من صنع مكوِّنات بصرية معقّدة «على الرقاقة» ذات مجال واسع من التطبيقات، مع إمكان تعديل تصميم المكوِّن بسرعة، وهذا ما يعطي معنى جديداً كلياً لمفهوم الإعداد السريع للنماذج الأولية.

وعلى غرار نظيراتها في تصنيع أنصاف النواقل، تتضمّن عملية نقل الأشكال النانوية خطوات عدة: بناء قالب محفور بشكل متمم للشكل النانوي المطلوب، ونقل الشكل إلى طبقة حسّاسة للضوء متوضعة على ركيزة محضَّرة من قبْل، ثم إزالة الطبقة المقاومة انتقائياً بالحفر الشاردي التفاعلي لنقل الأشكال النانوية إلى طبقة المادة المستهدفة على الركيزة. ويمكن استخدام تقانات مختلفة من قبيل الطباعة الضوئية الهولوغرافية والطباعة بالحزمة الإلكترونية لتكوين الصورة السلبية المطلوبة للبنية النانوية.

وكما هو الحال في كثير من التطبيقات القائمة على الليزر، أدرك الباحثون في المجال النانوي أن المواد التي يجري تداولها تمثّل أحد الجوانب الشديدة الأهمية في اختيار وتصميم تجهيزات القياس والتصنيع.

وفي هذا السياق، طوَّر الباحثون في جامعة كاليفورنيا ببركلي[72] طريقة ليزرية لشيّ جُسيْمات ذهب نانوية تسرِّع وتخفِّض تكلفة إنتاج الدارات المتكاملة. فباستخدام ليزر شوارد الأرغون، مع تقنية نفث الحبر وفق الحاجة، لترسيب ذهب مُسال على ركيزة، عرض كوستاس غريغوروبولُس (Costas Grigoropoulos) وزملاؤه، في قسم الهندسة الميكانيكية في جامعة كاليفورنيا ببركلي، إمكان طباعة

أشكال ميكرويّة ثنائية الأبعاد على غشاء رقيق خلال 5 دقائق. لقد عُلِّقت الجُسيْمات النانوية في مذيب، وسُخِّنت مباشرة بالليزر. وحين تبخُّر المذيب، تتكتل جُسيْمات الذهب النانوية المنصهرة، مؤدّيةً إلى تكوين خط ذهبي مستمر. وبيَّنوا أن أشعّة ليزر شوارد الأرغون، التي يساوي طول موجتها 488 نم، قد امتُصَّت كلياً ضمن عمق يساوي نحو 1 ميكرون تحت سطح محلول جُسيْمات الذهب النانوية.

وفقاً لقول غريغوروبولس، يوفّر العمل بمعلقات الجُسيْمات النانوية مزايا كثيرة مقارنة بسيرورات الدارات المتكاملة الحفرية المعهودة، ومن تلك المزايا عدم هدر المواد المرتفعة الثمن في عملية الحفر، حيث لا تُوضَّع المادة هنا إلا في الأماكن التي يجب أن تكون فيها على الركيزة، والعمل بالذهب عند درجة حرارة الغرفة، بدلاً من صهره عند درجة حرارة عالية.

«الشيء الذي لا تستطيع نسيانه هو أن الخواص في السلّم النانوي، من قبيل درجة حرارة الانصهار والحدود بين التحولات الطَورية، مختلفة»، يقول غريغوروبولس. «إن البحث الذي نقوم به يخص درجة حرارة انصهار منخفضة لجُسيْمات المعدن النانوية سوف تمكِّن من تلبيد تلك الجُسيْمات النانوية وكتابة الأشكال الإلكترونية الناقلة عند درجات حرارة منخفضة نسبياً ومتوافقة مع الركائز اللّدائنية».

«إن القضية الرئيسة في استخدام طاقة الليزر للمعالجة في السلّم النانوي هي حدود انعراج الضوء»، يقول دومانيديس. يساوي طول موجة الليزر عادة نحو 100 ميكرون، وهذه قيمة كبيرة جداً للمعالجة في السلّم النانوي. لكننا في قيد ابتكار طرائق جديدة لتجاوز هذه المشكلة، ومنها بصريات الحقل القريب، وتقنيات الفوتونات المتعدّدة، ورسم الأشكال البلازموني».

## توجُّهات وتطبيقات المركَّبات النانوية

### السيارات

ثمة سيرورة جديدة تجعل المواد النانوية المركَّبة قابلة للاستخدام في قطع جسم السيارة. وتُستخدم في هذه السيرورة أمواج الصوت لزيادة التوافق بين مواد التقوية الميكرويّة والراتنجات اللّدائنية المستخدمة في صنع قطع من المواد النانوية المركَّبة.

يُعطي مزْج جُسيْمات ميكرويّة صلبة، من صلصال سمكتيتي، مع راتنج لدائني مواد نانوية مركَّبة. ويفضّل مصنِّعو السيارات جُسيْمات الصلصال الضئيلة على حشوات التالك أو الميكا أو ألياف الزجاج الكبيرة التي غالباً ما تجعل سطوح القطع خشنة، وتجعل القطع تتصدّع بسهولة في الجو البارد. أما المواد النانوية المركَّبة، فهي أقوى وأخف وزناً من مواد اللّدائن الأخرى، ويمكن أن تحل محل الفولاذ والألمنيوم واللّدائن العادية في تطبيقات قطع جسم السيارة.

إلا أن تطوير المواد النانوية المركَّبة قد أُعيق بسبب المفاعيل المتبادلة المهملة بين الصلصال واللّدائن المستخدمة في السيارات من قبيل البولي بروبولين والبولي إيثيلين. لكن علماء السيارات وجدوا أن تعريض جُسيْمات الصلصال إلى اهتزازات صوتية في أثناء المزج يجعلها تنتشر انتشاراً أفضل عبر الحاضنة، محسِّنةً قوة القطعة من دون استخدام وسائل مكلفة. تنشر هذه الطريقة جُسيْمات الصلصال على شكل صفيحات مستقلة عبر الحاضنة.

على سبيل المثال، استخدم بعض مصنِّعي السيارات لوحات أبواب لدائنية طوال سنين. وللسماح للمادة بالتمدُّد والتقلُّص، تركوا فجوات بين الأبواب وعوارض الجسم الجانبية أكبر مما هو ضروري.

أما القطع المصنوعة من مواد نانوية مركَّبة، فهي أرخص وأخف، وتتصف بخصائص صدم أفضل، ومعاملي تمدّد حراري وخطي أصغر. وسوف يتيح استخدام تلك القطع للمصنِّعين التخلُّص من ترك الفجوات الكبيرة بين الأبواب، على سبيل المثال. ويتوقَّع أن يبدأ الإنتاج الكمي لتلك القطع باستخدام هذه التقانة خلال السنوات الخمس القادمة.

وبدأت شركة General Motors أخيراً، على سبيل المثال، باستخدام مادة مهندَسة نانوياً في درجة صعود السيارة الجانبية في السيارات الرياضية وشاحنات النقل. تتألف تلك المادة من صلصال مطحون حتى المقاسات النانوية، وبوليمر يعطيه المتانة وخفة الوزن المهمتين في صناعة السيارات. وبرغم أن تلك الصناعة قد استخدمت ألياف الكربون النانوية لتقوية إطارات الدواليب طوال سنين، فإن ابتكار شركة جنرال موتورز فاجأ شركات صناعة السيارات الأخرى.

حتى إشارات المرور في معظم تقاطعات الطرق تُصنع الآن من مواد نانوية صلبة تجعلها أكثر بريقاً وأقل استهلاكاً للطاقة بعشر مرات، وفقاً لقول تيرّي ميشالسكه (Terry Michalske)، مدير مركز التقانات النانوية المتكاملة (Center for Integrated Nanotechnologies) لدى مختبرات سانديا الوطنية في نيومكسيكو.

### الطلاءات

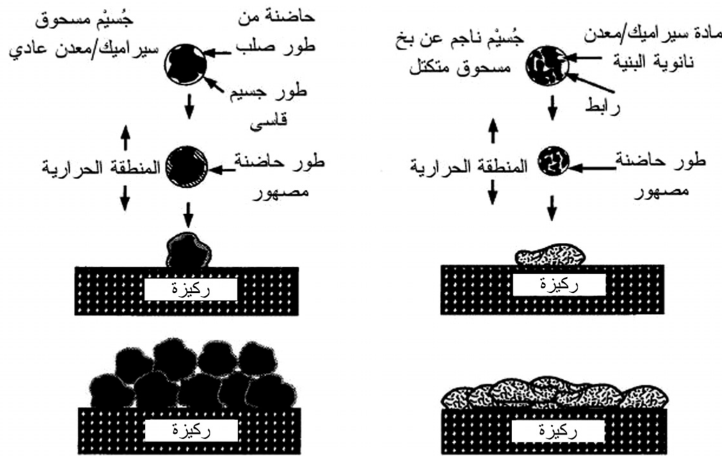
البخ الحراري هو سيرورة شائعة الاستخدام لتطبيق طلاء واقٍ على سطوح المواد. وإحدى سمات هذه السيرورة اللافتة هي إمكان إنتاج طلاءات تتراوح سماكاتها بين 25 ميكرون حتى عدة ميليمترات، من أي مادة تقريباً. تاريخياً، طُوِّر البخ الحراري لتوضيع طلاءات معدنية وسيراميكية ومركَّبة في تطبيقات تخصّ محرّكات الطائرات

ذات العنفات الغازية. لكن خلال السنوات العشر السابقة، توسَّع مجال التطبيقات بسرعة ليشمل العنفات الغازية الأرضية، ومحرّكات الديزل، والسيارات، والأدوات الجراحية، وقطع التبديل.

في البخ الحراري، تُلقَّم المساحيق في حاقن بخ يستخدم شعلة احتراق أو قوساً بلازمية، وتُسرَّع بتيار الغاز العالي السرعة الخارج من فوهة الحاقن. وفي أثناء وجود الجُسيْمات القصير الأمد ضمن الشعلة أو البلازما، تسخن بسرعة لتكوِّن رذاذاً من قطيرات منصهرة كلياً أو جزئياً. وتُعزِّز قوى الصدم الكبيرة التي تتولَّد حين وصول الجُسيْمات إلى سطح الركيزة، الالتصاق الشديد بها، معطية طلاءً قوياً.

بيَّنت الأبحاث الأخيرة في جامعة كونِّكتيكات[73] (Connecticut) جدوى البخ الحراري لمساحيق الـ WC/Co المتعدّدة الجُزَيئات لتكوين طلاءات عالية الجودة[74]. واقتُرحت طريقة أيضاً لإعادة معالجة المساحيق في أثناء تحضيرها لتتحوَّل إلى تكتلات مسحوق قابلة للبخ باستخدام نظم تلقيم المساحيق الشائعة، بقطع النظر عن طريقة تحضيرها، كيميائية كانت أم فيزيائية. يمكن فهم الفوارق المهمة بين البخ الحراري لمساحيق الـ WC/Co الميكرويّة والنانوية الحُبيْبات من الشكل 5 ـ 12. تخضع الجسميات الميكرويّة للانصهار السطحي فقط، وهذا يختلف عن الانصهار المتجانس أو الكلي للجُسيْمات النانوية. وعندما تصدم الجُسيْمات الركيزة، تنساب الجُسيْمات النانوية نصف الصلبة بحرية أكبر، مكوِّنة بذلك طلاء أشدّ كثافة، وذا بنية نانوية تامة التجانس. ونظراً إلى المفاعيل الحركية السريعة لذوبان للـ WC في الـ Co السائل، فإنه يمكن التوقّع بالمقادير النسبية لهذين الطَورين باستخدام مخطط التوازن الطَوري (Equilibrium Phase Diagram). لذا، فإن درجة التسخين الفائق إلى ما فوق درجة الحرارة الأصهرية شبه الثنائية (Pseudobinary Eutectic) للـ WC/Co يمكن أن تكون عامل تحكُّم. فكلما كان التسخين الفائق

للجُسيْم أشد، كانت لزوجته أقل، وكان معدل التشوّه حين اصطدام الجُسيْم بالركيزة أكبر. وفي الظروف الملائمة، يجب على الجُسيْمات نصف الصلبة أن تُبدي سلوك التسيُّل بالرج (Thixotropic)، أي إن اللزوجة الديناميكية يجب أن تنخفض مع زيادة معدل القص). ويجب أن يكون التدفق المضطرب العنيف الناجم عن الجُسيْمات الصادمة مفيداً في تفكيك تكتلات الجُسيْمات، ولذا، معزِّزاً للتجانس البنيوي في الطلاء المطبَّق.




**الشكل 5 ـ 12: مقارنة البخ الحراري لمسحوقي WC/Co**، أحدهما عادي، والآخر نانوي البنية.

بيَّنت الاختبارات قساوة أشدّ كثيراً في الطلاءات المصنوعة من المواد النانوية الحُبيْبات، شريطة اتخاذ التدابير اللازمة لدرء ضياع الكربون ضمن الشعلة أو البلازما. وإحدى طرائق تحقيق ذلك هي استخدام البخ بالبلازما المنخفضة الضغط، حيث تُحمّى جُسيْمات

المسحوق طبيعياً من الأكسدة ضمن شعلة البلازما[75]. يمكن بهذه الطريقة تحقيق طلاءات عالية الكثافة، مع قساوة عالية قابلة للتكرار. وفي حالة الخلائط ذات النسبة العالية من الكوبالت، يتألف الطلاء الناتج المبرد بالرش بالماء من حُبيْبات WC نانوية منتشرة في حاضنة غير متبلورة غنية بالكوبالت. وباستخدام البخ بشعلة من الأُكسجين الصافي، أي من دون هواء، تصبح مشكلة ضياع الكربون أخفّ وطأة منها في حالة البخ البلازمي، بسبب درجة حرارة الجُسيْمات المنخفضة والمدة القصيرة لبقائها ضمن الشعلة.

ويمكن أن يكون للطلاءات المصنوعة من مواد نانوية مركَّبة رقيقة جداً شبيهة بالألماس خواص مختلفة، تُفصَّل وفق الحاجة في مختلف المجالات، اعتماداً على تركيب الطلاء وعلى الإضافات الأخرى، أكانت عناصر خلط أو إشابة. ويمكن للركيزة التي سوف تُطلى أن تأخذ أشكالاً مختلفة، من القطع الميكانيكية حتى الأغشية اللّدائنية. ويمكن للمقاومة الكهربائية أن تُغيَّر باستمرار على مجال لا يقل عن 18 مرتبة كِبَر، من عازل مطلق حتى ناقل معدني، مؤدّيةً إلى تطبيقات مختلفة في طلاءات المقاومات، والطلاءات الناقلة، والطلاءات العازلة.

تتكوَّن الطلاءات النانوية المركَّبة الشبيهة بالألماس من شبكتين متداخلتين غير متبلورتين.. **الأولى** هي شبكة كربون شبيه بالألماس (a-C: H) **والثانية** شبيهة بالزجاج (a-Si:O). وتنقل الشبكة الثانية استقراراً عالياً إلى الأولى. ومن خواصها الأخرى المقاومة الكبيرة للتآكل والأكسدة، والشفافية الشديدة، ومقاومة الخدش الكبيرة.

وثمة حاجة متزايدة إلى بوليمرات مقاومة للكشط لاستعمالها في طلي المُحِسَّات والبصريات والنسُج والسلع الاستهلاكية الأخرى. وأحد تلك البوليمرات، وهو طلاء محِسَّات مكوَّن من إيبوكسي

وفتيلة كربون، ويتعرَّض إلى اهتراء شديد في أثناء الاستخدام، يُعالَج بالطلي بتغطيس ألياف التقوية الكربونية قبل غزل الفتيلة. في أثناء المعالجة، يجب أن تكون لزوجة الراتنج الذي تغطَّس فيه الألياف أقل من 3000 سنتيبواز عند 80 مْ لدرء تدنِّي خواص الراتنج.

لكن مواد الإيبوكسي العادية لا توفّر عموماً مقاومة اهتراء كافية. ولحل هذه المشكلة، جرى تطوير جُسيْمات بوليمرية تحتوي على بلّورات ألومينا نانوية.

## تكثيف الطَور الغازي

تُنتَج الألومينا ذات البلّورات النانوية باستخدام تقانة تكثيف الطَور الغازي[76] ((Gas Phase Condensation) (GPC))، وهي تقانة موجودة اليوم في مقدمة التقانات المستخدمة في صنع بعض أكثر المواد النانوية الطَور تقدُّماً.

يقوم تكثيف الطَور الغازي، المستخدَم في تحضير المساحيق المعدنية وغير العضوية، على تكوُّن بخار فيزيائي، يَنتُج من تبخير مادة عنصرية أو متفاعلة، يليه تكاثف فوري للبخار على شكل جُسيْمات نانومترية. وللحفاظ على الجُسيْمات النانوية وجعل تكتُّلها ضعيفاً، تبرَّد وهي معلَّقة بسرعة وتُخفَّف لدرء التلبيد المفرط (تكوين تكتلات صلبة) وتكوين التجمُّعات.

تتطلب تطبيقات كثيرة نشر الجُسيْمات النانوية في سائل. صحيحٌ أن كل تطبيق لنشر الجُسيْمات فريد بذاته، إلا أن سطوح جُسيْمات المسحوق يجب أن تكون دائماً متوافقة مع السائل الذي يحصل النشر فيه. وإذا كان التطبيق هو الطلي، وجب طلي جُسيْمات المسحوق إفرادياً بطبقة أصغرية من المادة من دون أن يؤدّي ذلك إلى تكتلات أو تجمعات.

ولتحقيق هذه المتطلبات، جرى أخيراً تطوير سيرورة طلي تغلِّف الجُسيْمات النانوية البلّورات بطلاء مديد العمر. بعد الطلي، تحفظ تلك السيرورة توزُّعَ أحجام الجُسيْمات الناجم عن سيرورة تكثيف الطَور الغازي. ويمكن هندسة الطلاء بحيث يسمح بانتثار الجُسيْمات النانوية في سوائل عضوية ذات ثوابت عزل كهربائي تقع قيمها بين 2 و20، وفي الماء. إن الطلاءات المفصَّلة وفق الطلب تمكِّن من تحقيق قيمة ثابت العزل للجُسيْمات النانوية المطلية المنثورة إفرادياً. ويمكن تضمين الطلاء مثبِّتات فراغية (Steric Stabilizers) بغية تحقيق استقرار انتثار أشد، أو مجموعات كيميائية معيّنة بغية تحقيق تفاعلية كيميائية معيّنة (مرغوب فيها).

وفي ما يخص المواد المركَّبة من إيبوكسي فتائل الكربون، جُعل مسحوق نانوي البلّورات من الـ $Al_2O_3$ (ذو مساحة سطحية نوعية تساوي 57 م$^2$/غ) متوافقاً مع الحاضنة البوليمرية المركَّبة، Shell 862، وذلك بطلي المسحوق. يُضاف إلى ذلك أنه جرى تعديل الطلاء كيميائياً للتمكين من التضمين التشاركي في الراتنج Shell 862. ونُثرت جُسيْمات الـ $Al_2O_3$ المطلية في الراتنج، وحصل تفعيل الانتثار بمزج الراتنج مع عامل الشيّ W (26.2 جزء من العامل W لكل 100 جزء من Shell 862).

وصُنعت مادة إيبوكسي فتائل الكربون المركَّبة بوساطة الطلي بالتغطيس المستمر لألياف الغرافيت في الراتنج ذي الجُسيْمات المنثورة، وتبع ذلك لفها حول عمود تشكيل. وشُويَت المادة في الخلاء عند درجة حرارة بين 149 و177 مْ مدة ساعة واحدة.

### النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

انغمست مختبرات بل (Lucent Technologies Bell Labs)،

وشركتَيْ Arryx وSiWave[77] في تطوير طريقة نزولية تهتم بتوسيع حدود التقانات الموجودة حالياً، وذلك بهندسة تجهيزات ذات سمات تصميمية في المستوى الشديد الصغر، من قبيل نظم تبديل ضوئية نانوية الحجم تُعرف بالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. إلا أن العلماء يحاولون استخدام الطريقة الصعودية لبناء التجهيزات النانوية باستخدام جُزَيء تلو آخر، أي بالطريقة نفسها التي تركِّب فيها المتعضيات الحية جُزَيئات أكبر، وهم يحاولون أيضاً تسخير السيرورات الطبيعية لتكوين مواد عضوية لم توجد في الطبيعة من قبل.

وكشف مختبر بحوث العلوم الكمومية لدى شركة Hewlett-Packard عن مشروع مخبري صعودي النهج لخزن البيانات صُنعت فيه أكثف ذاكرة إلكترونية حتى الآن. استُخدمت في المشروع جُزَيئات تسمّى روتاكسانات (Rotaxane) لتكوين ذاكرة قادرة على خزن ما يكافئ فيلم سينمائي كامل في مساحة تساوي مساحة ظفر اليد البشرية. تُحتَجز هذه البُنى الروتاكسانية عند تقاطعات أسلاك من البلاتين والتيتانيوم لا يتجاوز عرض الواحد منها 40 نم. وتستخدم شركة IBM، في مشروعها Millipede، 1024 ذراعاً دوّاراً صغيراً لتحقيق أثلام ذاكرة عرض الواحد منها 10 نم في مادة بوليمرية.

### التطبيقات الطبية

يمكن رؤية أحد أمثلة التقارب في ما بين الطرائق الصعودية والنزولية في المجال الطبي، وتحديداً في المحِسَّات الحيوية القابلة للزرع في الجسم المصمَّمة لتزويد مرضى السكر بالدواء. تُستخدم التقانة الصعودية في تغليف وتوزيع الدواء، في حين أن الطريقة النزولية تُستخدم لصنع تجهيزة الإشارة الإلكترونية التي تفعِّل تحرير الدواء.

## النسيج والملابس

حضَّرت الشركة Nano-Tex[78] نُسُجاً مهندَسة تُستخدم فيها ألياف ضئيلة لطرد أوساخ ورطوبة التعرُّق لدى الرياضيين. واستقصت شركات أخرى، ومنها DuPont وCorning، ومعاهد بحث كجامعة كورنل وجامعة نورث كارولينا وجامعة تكساس، استخدام التقانة النانوية لصنع نُسُج أطول عمراً وأخف وزناً وأقدر على امتصاص الأصبغة.

يحتوي النسيج الطارد للأوساخ Nano-Care الذي تصنعه الشركة Nano-Tex على مليارات من الألياف الضئيلة التي يساوي طول الواحد منها 10 نم، متضمَّنة في القطن أو الكتان العادي. إن هذه الألياف النانوية الصادة للماء، التي تسميها الشركة «شعيرات نانوية»، تجعل النسيج كثيفاً وتزيد من التوتر السطحي الذي يمنع قطرات السائل من التغلغل فيه، تماماً على غرار قطرات المطر التي تسقط على سيارة حديثة التلميع. وتقول الشركة أن النسيج المعالج بهذه الطريقة يتحمل 50 عملية غسيل وتجفيف وكيٍّ في المنزل قبل أن تفقد فاعليتها.

يختلف هذا النسيج وغيره من المواد المعالجة بالتقانة النانوية عن الطلاءات النسيجية التي هي من قبيل 3M's Scotchgard، في أن الألياف النانوية مضمَّنة فعلاً في المنتج، في حين أن الطلاء يُطبَّق على المنتج النهائي بالبخ عادة، ولا يحمي إلا ما يمكن بخّه.

يمكن استخدام التقانة النانوية أيضاً في صناعة النسيج لزيادة قابلية النسُج التركيبية، ومنها تلك التي تُصنع من البولي بروبيلين، لامتصاص الأصبغة. إن معظم البولي بروبيلينات تقاوم الصباغ، وهذا ما يجعلها غير ملائمة لتكون سلعاً استهلاكية كالملابس وأغطية

الطاولات وستائر النوافذ. لكن في إحدى التقنيات التجريبية، سُحق صلصال خاص أليف للأصبغة ليصبح جُسيْمات نانوية، وشُحنت هذه الجُسيْمات بشحنة كهربائية موجبة ضعيفة لمنعها من التكتل معاً. ثم مُزج الصلصال مع كمية من البولي بروبيلين الخام قبل أن يُبثق لتكوين خيوط تُغزل على شكل ألياف تُنسج لإنتاج النسيج. وكانت النتيجة مادة مركَّبة تستطيع امتصاص الصبغة من دون إضعاف النسيج، (انظر الشكل 5 ـ 13).

ومن التطويرات الأخرى نُسُج نانوية لا تحتجز الروائح، ومنتَج يسمّى Nano-Touch، وهو غمد شبيه بالقطن يُلف حول الخيوط التركيبية. ويصنع آخرون ملابس نانوية فضفاضة مجفِّفة تمسح العرق عن الجلد.

## النوابض الميكرويّة

تقف النوابض الضئيلة القريبة من الميكرويّة، المصنوعة بواسطة تقنيات الطباعة الضوئية المستخدمة في صناعة أنصاف النواقل، جاهزة لدخول السوق، موفرة لمصمِّمي الدارات المتكاملة تحسينات أساسية في الوصلات بين الرقاقة والأرجل الخارجية، إضافة إلى تسهيلات تخص اختبار الدارة.

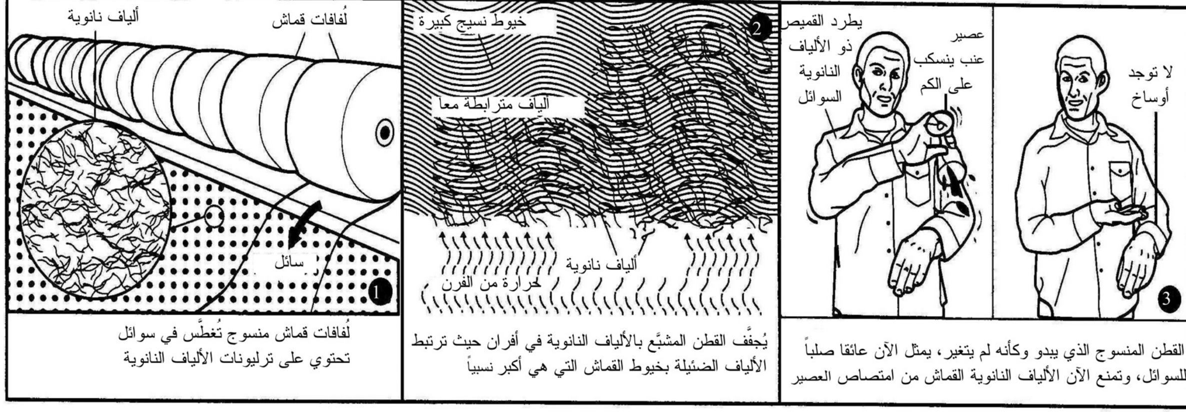
وثمة تجمُّع من مركز بحوث شركة Xerox في بالو ألتو، وشركة NanoNexus Inc. بفرمونت في كاليفورنيا، ومعهد جورجيا التقاني (Georgia Institute of Technology) بأطلنطا، يقوم بتطوير مسابر اختبار وعلب عالية الكثافة للدارات المتكاملة.

تُصنع النوابض على دفعات على شُراحات سليكونية باستعمال تقنيات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. توضَّع أصابع معدنية من غشاء رقيق، بخطوة (المسافة من وسط أصبع حتى وسط الأصبع

المجاورة) تساوي 6 ميكرون، على ركيزة باستخدام الطباعة الضوئية المعهودة. وبالتحكُّم الدقيق بسيرورة توضيع المعدن، يُولِّد الباحثون توتراً ميكانيكياً بين سطحي الشريط المعدني العلوي والسفلي. وحين تُحفر الركيزة جزئياً لإزالة الأجزاء في ما بين الأصابع، يؤدّي التوتر إلى جعل إحدى نهايتي الشريط تلتف مبتعدة عن الركيزة، ومكوِّنة تماساً نابضياً صغيراً.

تمكِّن هذه التقنية من تحقيق وصلات عالية الكثافة بين الدارة وأرجل العلبة الخارجية: أكثف بعشر مرات من أفضل وصلات اللحام الحالية. وهذا مهم لأنه مع تطور الطباعة الضوئية التي تسمح بصنع دارات متزايدة التعقيد بتفاصيل متزايدة الصغر، تزداد صعوبة وصل الدارة مع العالم الخارجي بواسطة وصلات اللحام المعتادة التي استنفدت إمكاناتها، في حين أن التماسات النابضية الميكرويّة ما زالت متقدمة بنحو جيل، وفق رأي الباحثين. وتعني نابضية النوابض أيضاً أنها تمتص الانفعالات الميكانيكية التي تتولَّد نتيجة وضع الدارة على الركيزة، لأنهما تمتلكان عاملي تمدّد حراري مختلفين. وخلافاً للحام، تخلو هذه التماسات من الرصاص.

وتُطوِّر الشركات أيضاً تقانات من قبيل Nano-Springs™ لمسابر اختبار الدارة والشُراحة، لأنه يمكن تصغير التماسات الجديدة بسهولة لتحقيق متطلبات تقليص المقاس وزيادة الدقة التي لا يمكن تحقيقها بأي تقانة أخرى، وكل ذلك بتكلفة منخفضة. وقد جرى أخيراً عرض إمكان اختبار تماسات مع نتوءات من الذهب بخطوة تساوي 52 ميكروناً شائعة في تماسات دارات تشغيل الشاشة في الهاتف الخلوي. وهذه التقانة متوجهة الآن نحو تحقيق خطوات بين التماسات تصل بصغرها حتى 35 ميكروناً باستعمال معادن أخرى.




**الشكل 5 ـ 13: كيفية صنع قماش الألياف النانوية الطارد للأوساخ.**

يواجه ستانلي وليامز (Stanley Williams) ومجموعته في مختبرات Hewlett-Packard مهمة كبرى: محاولة صنع حواسيب يقوم مبدؤها على عمل الجُزَيئات. وفِعلُ ذلك يعني إعادة اختراع الترانزستور. صحيحٌ أن السليكون وأنصاف النواقل اللاعضوية الأخرى كانت دائماً لَبِنات البناء الأساسية للدّارات الميكرويّة، إلا أنه تبيَّن أيضاً أن الجُزَيئات العضوية يمكن أن تمتلك بعض الخواص الكهربائية المفيدة. وبالفعل، على مدى السنوات القليلة الماضية، تعلَّم الباحثون كيفية تركيب جُزَيئات تستطيع العمل كمفاتيح إلكترونية، أو خزن الوحدان والأصفار كالذاكرة، أو المساهمة في بعض العمليات المنطقية. هذا إضافة إلى أن الجُزَيئات تتصف بمزية مهمة هي أنها بالغة الصغر حقاً.

إن هذا العمل مهم جداً لمستقبل الحوسبة، لأن تقانة تصنيع الرقاقات المعهودة في طريقها إلى التصادم مع المتطلبات الاقتصادية. فأفضل الرقاقات الحاسوبية اليوم تحتوي على أشكال سليكونية تصل بصغرها حتى 90 نم. لكن كلما كانت تلك الأشكال أصغر، كانت الأجهزة الضوئية اللازمة لتصنيعها أثمن. فبناء معمل يقوم على آخر ما تُوصِّل إليه لتصنيع رقاقات السليكون الميكرويّة يكلف اليوم نحو 3 مليارات دولار. من ناحية أخرى، يمكن اليوم من حيث المبدأ صنع رقاقة استُعيض فيها عن الترانزستورات السليكونية بتجهيزات جُزَيئية بواسطة سيرورة كيميائية بسيطة تكلفتها من رتبة تكلفة صنع فيلم فوتوغرافي. ويمكن لدارة تحتوي على 10 مليارات مفتاح أن توضع في النهاية في حُبيْبة ملح، أي إنها سوف تكون أكثف بألف مرة من الترانزستورات الموجودة في أفضل حواسيب اليوم. ويمكن لحاسوب مصنوع من هذه الدارات أن يبحث ضمن مليارات الوثائق، أو ضمن

أفلام ديو تصل مددها حتى آلاف الساعات، في بضع ثوان، وأن يُجري محاكاة وتوقّعات عالية الدقة بالطقس وغيره من الظواهر الفيزيائية، وأن يحقق أداء أفضل كثيراً في تقليد الذكاء الإنساني، وأن يتواصل معنا ربما من خلال محادثة طبيعية.

**متفرقات**

لقد غفل الصخب العلمي المرافق للمستجدات في التقانة النانوية، وما انطوت عليه من مصطلحات أو كلمات من قبيل **الأنابيب النانوية والروبوتات النانوية والرقاقات النانوية،** عن جوانبها الحقيقية والعملية. فالتقانة النانوية في منتجات الاستهلاك اليومي قد تبدو أمراً يجمع المتناقضات، إلا أن ثمة بضعة أمثلة موجودة فعلاً في المساحيق والبلّورات والفخاريّات. وليس عليك أن تبحث عنها في مكان أبعد من بيتك.

وليس من المفاجئ أيضاً أن يكون تعريف التقانة النانوية ما زال ضبابياً. وفي حين أن مصنِّعي الرقاقات والدارات المتكاملة يدفعون باتجاه تعريف نزولي، قائم على التصغير المستمر، فإن علماء المواد الذين ينظرون من الجهة المعاكسة يجادلون بأن هذا الاختصاص يقوم على تصميم وهندسة النظم باستخدام جُزَيء تلو آخر. وبرغم أن علم الأشياء الصغيرة لم يظهر في عناوين الصحف إلا منذ مدة قصيرة، انغمس العلماء بصمت في تطوير خواص المواد النانوية منذ خمسينيات القرن العشرين، حينما استُخدمت المصافي النانوية المسامات التي عُرفت بالزيولايت، أول مرة في فصل النفط الخام إلى مكوّنات مفيدة. حتى نوافذ الزجاج الملوّنة التي تحتوي على بلّورات نانوية متنوعة، تدين بألوانها الزاهية إلى تفاعلات الجُزَيئات البالغة الصغر (انظر الشكل 5 ـ 14).

**صقل الدارات الميكروية**

أول استخدام تجاري واسع في عام 2001

مع تضاؤل أحجام الرقاقات الحاسوبية، تصبح أكثر عُرضة للخدوش الضئيلة النانوية المقاس التي تحصل أثناء التصنيع. لذا تطوِّر الشركة (Cabot Microelectronics) معلقاً يحتوي على جسيمات نانوية يمكن أن تصقل الخدوش النانوية التي على الدارة. باستخدام مزيج من الكواشط الكيميائية والميكانيكية، تصقل الجسيمات المصنوعة بعناية طبقات السليكون دون إحداث خدوش جديدة.

**حمامات سهلة التنظيف**

أول استخدام تجاري واسع في عام 1999

تطوِّر الشركة الألمانية (Nanogate) طلاء على شكل غشاء رقيق يتكوّن من جسيمات نانوية، الفجوات بينها شديدة الضآلة إلى حد لا يسمح للجسيمات الأخرى بالتوضع بينها، ولذا لا تلتصق الأوساخ بالسطح. ولا تسبب الجسيمات النانوية انكسار الضوء، ولذا يكون الطلاء شفافاً وتبقى الألوان الأصلية لحوض الحمام السيراميكي وحامل المرذاذ وسواها مرئية.

**لصيقات طبية مضادة للجراثيم**

أول استخدام تجاري واسع في عام 1998

استخدمت الفضة طوال سنوات بوصفها مضادا للجراثيم. لكنها بصيغتها النانوية تقتل الجراثيم على نحو أسرع وتقلص إمكان الالتهاب (على نحو عجيب). يحشو الصيدلانيون فضة نانوية البلورات في لصيقات الحروق والجروح التي يصفها الأطباء وتستخدمها العيادات.

**واقي شفاف لجلد الوجه من أشعة الشمس**

أول استخدام تجاري واسع في عام 2001

تعمل المراهم الواقية من الشمس العادية بامتصاص الأشعة فوق البنفسجية الضارة واقية الجلد بذلك. ويُعدُّ أكسيد الزنك، الذي يتصف باللون الأبيض لأن بلوراته تبعثر الضوء، ماصا ممتاز للأشعة فوق البنفسجية. إلا أن المستهلكين يريدون مراهم واقية شفافة. وهذا ما ابتكر في المشروع الكوري الأسترالي المشترك للتقانة النانوية المتقدمة: مسحوق نانوي شفاف. إن بلوراته ذات الـ 25 نم أصغر من طول موجة الضوء المرئي، ولذا تفقد بياضها. إن مقدرة البلورات على امتصاص ضوء الشمس تعني أنه يمكن استعمالها في تجهيزات طاقة شمسية يمكن أن تكون شفافة تقوم على التقانة النانوية.

**زجاج ذاتي التنظيف**

أول استخدام تجاري واسع في عام 2001

تطوِّر الشركة البريطانية Pilkington زجاجاً نانوياً ينظف نفسه بمساعدة الماء وضوء الشمس. يمتص سطحه ذو السماكة النانوية طيفا واسعا من الترددات الضوئية في أشعة الشمس ويستخدم طاقته لتفكيك الأوساخ العضوية معطياً جزيئات ضئيلة قابلة للانحلال في الماء. ونظراً إلى أن السطح أليف للماء، فإن ماء المطر يمسح الزجاج بسهولة حاملا الوسخ المفكك معه.

**سراويل نانوية**

أول استخدام تجاري واسع في عام 2001

تنسج شركات ملابس عدة، ومنها Eddie Bauer و Gap و (Levi Strauss) ألیافاً نانوية أنتجتها شركة البحث Nano-Tex في السراويل والسترات التي تنتجها. بهندسة الملابس في المستوى الجزيئي، تصبح مقاومة للتجعد، وطاردة للزيوت، وسريعة الجفاف، وفق ما تقول به الشركة Nano-Tex.

**كرات تنس أشد ارتدادا**

أول استخدام تجاري واسع في عام 2001

من التحديات إيجاد مادة تحبس الهواء في كرة التنس تماما وتبقى مع ذلك مرنة. إلا أن شركة صنع كرات التنس Wilson Sporting Goods تستخدم مزيجاً من رقائق صلصال نانوي المقاس وكريات مطاطية مكروية المقاس طلاء لكرات تنس عالية الجودة لمصلحة مباريات كأس ديفيز الرسمية. تكوّن رقائق الصلصال الصغيرة عائقا جزيئياً يحبس جزيئات الهواء، في حين أن كريات المطاط في المزيج تضمن مرونة كرة التنس. وثمة خطط لاستخدام الطلاء في عجلات السيارات لجعلها شديدة الإحكام لمنع تسرب الهواء منها، وفي القفازات الواقية غير النفوذة، وقوارير البيرة غير الزجاجية.

الشكل 5 ـ 14: تطبيقات التقانة النانوية.

## الجُسيْمات النانوية

ثمة طرائق عدة لإنتاج الجُسيْمات النانوية. فمثلاً، استخدم تِد كامينز[79] (Ted Kamins) مفاعل توضيع الأبخرة كيميائياً. حيث نمَّى الأسلاك النانوية اللازمة للإلكترونيات الجُزَيئية بتلك الطريقة لتكون بديلاً لطباعة الأشكال النانوية ضوئياً. لقد صنع كامينز حتى الآن أسلاكاً تصل بصغر أقطارها إلى 10 نم من خلال تعريض «جُسيْمات نانوية» من مواد مختلفة إلى مزيج من الغازات ضمن مفاعل التوضيع، حيث نمت سلاسل طويلة من السليكون حول الجُسيْمات لتكوين ما يبدو تحت المجهر الإلكتروني كغابة من الإبر.

وأنتجت سيرورة جديدة طُوِّرت في جامعة إلِّنوي طائفة من الجُسيْمات النانوية الفائقة الصغر التي يمكن استخدامها في الشاشات الإلكترونية وفي الذاكرة الومضية. ويمكن أن تكون مفيدة أيضاً في العلامات الفَلْوَرِيّة الشديدة التألُّق المستعملة لوسم المواد الحساسة حيوياً.

للحصول على جُسيْمات نانوية، يغطِّس الباحثون شُراحة سليكونية تدريجياً في حوض يحتوي على مادة حافرة هي حمض الفلور وبروكسيد الهيدروجين في أثناء تمرير تيار كهربائي عبره. فيأكل المحلول الطبقة السطحية، تاركاً شبكة رقيقة من البُنى النانوية الضعيفة الترابط. ثم تعرَّض الشراحة إلى حمام فوق صوتي يفتت الشبكة النانوية البنية إلى مجموعات من جُسيْمات قطر الواحد منها 1 نم تُفرَز بعدئذٍ إلى مجموعات ذات مقاسات مختلفة.

تتألق جُسيْمات السليكون الناتجة بألوان مختلفة، حين تعرُّضها للضوء فوق البنفسجي، تبعاً لمقاساتها. وهي تتألق أيضاً حين تعرُّضها إلى فوتونين على الأقل من الضوء تحت الأحمر الذي يستطيع

اختراق نُسُج جسم الإنسان من دون إيذائها. أكثر من هذا، تمكَّن الباحثون من جعل تجمعات صغيرة من الجُسيْمات النانوية تدخل في اهتزاز ليزري. إن مجموعات الجُسيْمات تلك التي يبلغ قطر الواحد منها 6 ميكرون، تمثّل واحدة من أصغر الليزرات في العالم، وتُري أن الليزرات الميكرويّة هي خطوة مهمة نحو تحقيق الليزر ضمن الرقاقة، الذي يمكن في النهاية أن يحوِّل الوصلات السلكية ضمنها إلى وصلات ضوئية.

وثمة تطبيقات للجُسيْمات النانوية قيد الاستعمال في معاجين دهان السيراميكات، وفي معالجة الفحم الحجري. وثمة تطبيقات أخرى، منها ما هو في مرحلة الطفولة، أو في طَور البحث والتطوير، أو جرى اختبار أدائها قبل الكشف عنها ووضعها في الاستخدام العسكري والتجاري والصناعي. وفي ما يأتي وصف لكثير من حالات الجُسيْمات النانوية المذكورة آنفاً.

عرض خبراء المواد في جامعة ولاية آيوا، الذين يعملون جزئياً بمنحة من هيئة العلوم الوطنية، طلاءً جديداً يجعل السطوح «ذكية»، بمعنى أن السطح يستطيع أن ينتقل بين حالتين، حالة زجاجية ملساء، وحالة مطّاطية، في السلّم النانوي، أي عند مقاسات بضعة جُزَيئات فقط.

من التطبيقات الممكنة لهذا الطلاء التجميع الموجَّه للجُسيْمات النانوية اللاعضوية والبروتينات والأنابيب النانوية، والتحكُّم الفائق الدقة بالسوائل المنسابة عبر التجهيزات السوائلية الميكرويّة التي تشق طريقها في البحث الطبي الحيوي والتشخيص المرضي.

يتكوَّن الطلاء الجديد من طبقة واحدة من الجُزَيئات «الفرشاتية» ذات الشكل Y، وفق قول الباحثين الرئيسيين فلاديمير تسوكروك (Vladimir V. Tsukruk) وأوجين زوباريف[82] (Eugene Zubarev).

يُلصَق الجُزَيء بالسطح عند قاعدة الـ Y، وهذا يشكِّل نوعاً من

مقبض الفرشاة، ويُمَد الذراعان الطويلان إلى الخارج لتكوين شعر خشن. يمكن للطلاء الانتقال بين الحالتين لأن أحد الذراعين هو بوليمر أليف للماء، في حين أن الثاني هو بوليمر نفور من الماء.

لذا، وفقاً لقول الباحثين، عندما يتعرَّض السطح المطلي إلى الماء، تتجمع الجُزَيئات في سلسلة من الأكوام التي عرض كل منها 8 نم، مع بقاء الأذرع الأليفة للماء في الأعلى حاجبة الأذرع النفورة من الماء في الداخل. وحين معالجة السطح بمذيب عضوي كالتولوين، يعيد السطح ترتيب نفسه تلقائياً في أكوام تكون فيها الأذرع النفورة من الماء في الأعلى. ليس من المفاجئ أن هاتين الحالتين تختلفان في خواص من قبيل اللزوجة وقابلية الابتلال.

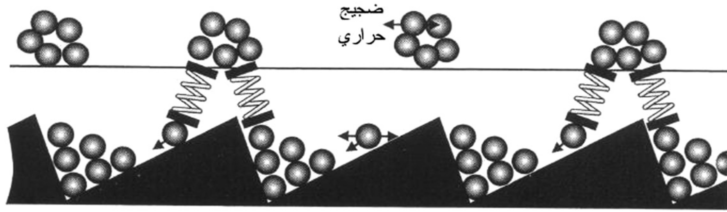
يأمل فريق جامعة آيوا، في عمل مستقبلي، أن يرتب الأكوام في أنماط منتظمة، بدلاً من الأكوام الحالية المتبعثرة عشوائياً، وذلك بغية صنع سطوح زلقة في اتجاه، ودَبقة في الاتجاهات الأخرى.

وكشف باحثون آخرون عن طريقة جديدة للتحكُّم بحركة الجُسيْمات من دون الميكرويّة في تجهيزات نانوية صناعية، وفي النظم الحيوية، حيث يمكن لهذه التقنية إيصال الدواء إلى خلايا محدّدة، أو تبديل أسلاك تجهيزات إلكترونية جُزَيئية المقاس.

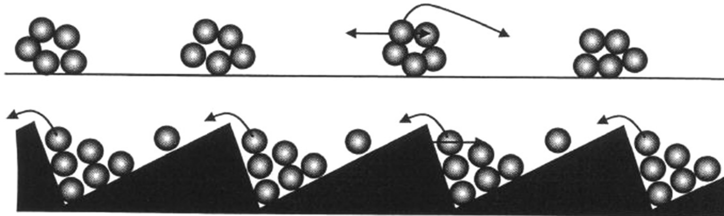
تقوم الفكرة التي ابتكرها فيزيائي وباحثون آخرون في جامعة متشيغان، على إضافة جُسيْمات مساعدة تتفاعل مع الجُسيْمات الأساسية. وهذا يسهِّل التحكُّم بكيفية جريان الجُسيْمات موضع الاهتمام. ويمكن حينئذٍ لركائز لها شكل سن منشار غير متناظر، أن تجعل الجُسيْمات (الشوارد أو الجُزَيئات) تجري في اتجاه واحد بدلاً من التجوال العشوائي.

على سبيل المثال، إذا تنافر نوع من الجُسيْمات مع نوع آخر، فإنهما سيجريان في اتجاهين متعاكسين. وإذا تجاذبا، فإن النوع النشيط سوف يجر النوع الآخر غير النشيط معه. إن هذا التقويم غير

المباشر لحركة الجُسيْمات يمكن أن يُستخدم لإخراج أو إزالة المكوِّنات غير النشطة من خلية، أو من تجهيزة صناعية جُزَيئية المقاس. ويمكن لهذه التجهيزات الضئيلة، أو سيور النقل الميكرويّة أن تعمل أيضاً كنوع جديد من الأسلاك لتحل محل الأسلاك العادية في التجهيزات النانوية (انظر الشكل 5 ـ 15). وفقاً لقول فريق العمل، يمكن لحقن جُسيْمات غير نشطة بكثافة ملائمة أن يتحكّم بسرعة الجُسيْمات النشطة، والعكس صحيح.




عند درجات الحرارة المنخفضة، يكون الضجيج الحراري أضعف من أن يدفع الكرات لاجتياز الحاجز.
وعندئذ، تتحرك الجُسيْمات الحمراء نحو أسفل الأخاديد دافعة الجُسيْمات الخضراء نحو ذرى الركيزة.



وعند درجات الحرارة المرتفعة، يهز الضجيج الحراري الجُسيْمات بقوة تكفي لجعلها تقفز فوق الحاجز.
ويقوم اللاتناظر المكاني المتعاكس للكرات الحمراء والخضراء بدفعها في اتجاهات مختلفة.

**الشكل 5 ـ 15: سير نقل ميكروي.**

وثمة استخدامات كثيرة متنوّعة للمطّاط السليكوني وغيره من المواد شبه المطّاطية، لكن في جميع الحالات تقريباً، يجب تقويتها بجُسيْمات لجعلها أقوى أو أقل نفوذية للغازات والسوائل. وقد ابتكر جيمس مارك (James Mark)، أستاذ الكيمياء في جامعة سينسيناتي، وزملاؤه تقنية تقوي المطّاط السليكوني بجُسيْمات نانوية، لكنه يترك بلّورات المادة شفافة.

غالباً ما يقوَّى المطّاط السليكوني بجُسيْمات السليكا الضئيلة (وهي المكوِّن الرئيس للرمل والكوارتز الفلزي). إلا أن جُسيْمات السليكا تلك يمكن أن تُغبِّش المطّاط، وهذا يمثل مشكلة للأقنعة الواقية والعدسات اللاصقة والأنابيب الطبية التي تعتمد على شفافية المطّاط السليكوني[83].

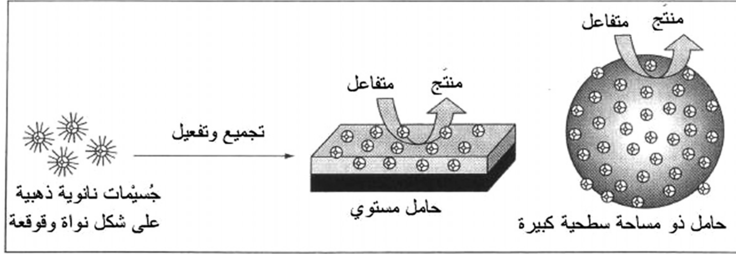
في هذه التقنية، يُحقن المطّاط السليكوني بجُسيْمات نانوية أصغر من جُسيْمات السليكا بما يصل إلى خمس مرات، يجري تكوينها بطرائق مشابهة لطريقة صنع جُسيْمات السليكا، وتحقِّق مستوى التقوية نفسه، مع محافظتها على شفافية المطّاط السليكوني.

ويمكن أيضاً استخدام أنماط أخرى من هذه التقنية لتحسين خواص أخرى للمطّاط السليكوني والمواد المشابهة، كعدم النفوذية للغازات والسوائل. وهذا يمكن أن يؤدّي إلى صنع أقنعة أو ملابس أفضل للوقاية من المواد الكيميائية والحيوية التي يمكن أن تُستخدم في هجوم إرهابي.

تُعتبر هذه التقنية أفضل من الطرائق الأخرى التي تستخدم التفاعل الكيميائي لتكوين جُسيْمات سليكا ضمن بوليمر السليكون. بتوليد محفِّز التفاعل المطلوب في مكان التفاعل من ملح القصدير، وبالاكتفاء بمقدار الماء الذي يُمتص من البخار الذي في الهواء، تبقى

جُسيْمات السليكا أصغر، أي بأقطار بين 30 و50 نم، وتنتشر انتشاراً متجانساً خلال المطّاط السليكوني. عند ذلك المقاس الذي هو أصغر من طول موجة الضوء فوق البنفسجي، والضوء المرئي طبعاً، تكون جُسيْمات السليكا غير مرئية من حيث المبدأ.

إن المقدرة على تسخير النسب الكبيرة لمساحات السطوح إلى الحجوم في الجُسيْمات النانوية، إضافة إلى خواصها السطحية الفريدة في مجال المقاسات التي هي أصغر من 10 نم، خصوصاً في المحفِّزات المتباينة، تمثل قوة محرّكة رئيسة في كل من البحوث الأساسية والتطبيقات العملية للمحفِّزات النانوية الجُسيْمات في خلايا الوقود. وهذا هو مجال المقاسات الذي تخضع فيه الجُسيْمات إلى التحوُّل من الخواص الذريّة إلى الخواص المعدنية. وفي الواقع، لقد تحرَّضت دراسة هذا الجانب الفريد باكتشاف الفاعلية التحفيزية العالية لجُسيْمات الذهب النانوية تجاه أكسدة الـ CO[84][87]. لكن الذهب يُعتبر عادةً غير فاعل كمحفِّز من الناحية العملية عندما تنخفض مقاسات الجُسيْمات إلى بضعة نانومترات. في الواقع، ثمة صعوبتان رئيستان في تطوير المحفِّزات النانوية الجُسيْمات هما **(1)** السيطرة على المقاسات والتركيب، و**(2)** درء النزوع إلى تكتل المادة النانوية. إن الاستقصاءات الأخيرة للجُسيْمات النانوية التي هي من نوع النواة والقوقعة (Core-Shell) الذي يمكن أن يُعرَّف عموماً بأنه نواة وقوقعة من مادتين مختلفتين وثيقتي التفاعل لاعضوية/ لاعضوية، وعضوية/ عضوية، ولاعضوية/ حيوية[88][90]، توفِّر سبلاً مثيرة لمعالجة المشكلتين الآنفتي الذكر. فاستخدام مثل هذه الجُسيْمات النانوية لَبِنات بناء لمواد محفِّزة يقوم على مزايا متنوعة، منها أحادية المقاس، وقابلية المعالجة، وقابلية الانحلال، والاستقرار، وإمكان التجميع الذاتي، والخواص البصرية والإلكترونية والمغنطيسية والكيميائية/ الحيوية الفريدة (انظر الشكل 5 ـ 16).




**الشكل 5 ـ 16: رسم توضيحي لتجميع وتفعيل جُسيْمات نواة وقوقعة نانوية، بوصفها محفزات، على ركيزة مستوية وأخرى ذات مساحة سطحية كبيرة. وتمثِّل السيرورة متفاعل ـ منتَج تفاعلاً محفَّزاً.**

باختصار، يمكن إنتاج جُسيْمات نانوية من الذهب وخلائطه، يُتحكَّم بمقاساتها وتركيبها بضم طرائق التركيب القائم على القلنسوة (Capping-Based) إلى طرائق المعالجة المفعَّلة حرارياً. لكن برغم أن استقصاءات المحفِّزات الذهبية النانوية كانت ناجحة في تفاعلات خلايا الوقود، إلا أنه ليس واضحاً إنْ كان بالإمكان استخدامها في النهاية بوصفها محفِّزات عملية في تلك الخلايا متوافقة مع محفِّزات الـ (platinum Group Metal) (PGM) الموجودة. إن الإجابة عن هذا السؤال تقتضي بالتأكيد دراسة تفصيلية جوهرية لإمكان التحكُّم التام بمقاسات جُسيْمات الذهب النانوية وتركيبها السطحي في أثناء تفعيل التحفيز والتفاعل. إن التطوير السريع لتقانة نانوية قائمة على الذهب سوف يساعد كثيراً على الوصول بسرعة إلى الذهب «المصمَّم للتحفيز».

ومكَّن الاستخدام الذكي للجُسيْمات النانوية فريقاً من العلماء من معهد البحوث[91] (Research Triangle Institute) (RTI) وجامعة نورث كارولينا الحكومية من صنع أغشية لدائنية تسمح بمرور الجُزَيئات الكبيرة بسرعة أكبر من سرعة مرور الجُزَيئات الصغيرة.

سابقاً، كانت الأغشية تغدو أقل انتقائية مع زيادة نفوذيتها. «إن إضافة جُسيْمات إلى اللّدائن تجعلها عادةً أقل نفوذية»، هذا ما يقوله تيم مركل (Tim Merkel) من الـ RTI. «على سبيل المثال، يمكن استخدام المُضافات إلى مادة الأكياس اللّدائنية لتخفيض مقدار الأُكسجين الذي ينفذ إلى داخلها بغية إبقاء الطعام طازجاً مدة أطول. أما في حالتنا، فإن الجُسيْمات تعمل في المستوى الجُزَيئي كفراغات نانوية فاتحة الغشاء، وجاعلةً إياه أشدّ نفوذية».

تُستخدم هذه الأغشية لتنقية الهيدروجين المستعمل في خلايا الوقود، وللتخلُّص من الكيماويات المسببة للتلوّث في الوقود الأُحفوري. حالياً، تتغيّر بنية الغشاء الفيزيائية فقط، إلا أن البحث المستقبلي سوف يستقصي صنع أغشية نشطة كيميائياً لتمرّر أو تحتجز كيماويات معيّنة.

لقد بلغت صفيفات البوابات القابلة للبرمجة (Programmable Gte Array) (PGA) والرقاقات الإلكترونية السطحية التجميع مرحلة من الصغر والتعقيد أصبحت عندها حتى لصيقات اللحام القصديري الدقيقة جداً خشنة جداً لتحقيق التصاق خالٍ من العيوب في الدارة المطبوعة. ومن حسن الطالع أن الخطوة التالية للصيقات اللحام هي قيد الاختبار فعلاً: أحبار نانوية الجُسيْمات. تولَّد جُسيْمات نانوية معدنية وتعلَّق في حاضنة مذيبة عضوية شديدة النقاوة. تمكِّن هذه الطريقة من خزن هذه الجُسيْمات الذريّة المقاس تقريباً والخالية من الأُكسيد تماماً، ومن تداولها بسهولة. على سبيل المثال، تُصنع معلَّقات سائلة ذات جُسيْمات نانوية تشابه الحبر الأزرق الغامق من معدن واحد، لا من خليطة ممزوجة سابقاً، ثم تُخلط السوائل المختلفة حين الاستخدام بنسب معيّنة لتكوين خليطة متعدّدة المعدن. وقد جرى أخيراً استخدام أربعة أحبار (قصدير، فضة، نحاس،

إنديوم) لتكوين خليطة معقّدة خالية من الرصاص. ونظراً إلى أن الجُسيْمات خالية من الأُكسيد، فإنها تمتلك طاقة سطحية كبيرة. لذا، حين زوال المذيب بالتطاير، فإن الجُسيْمات تترابط أو تندمج معاً على الفور. ونظراً إلى أنه يمكن تحقيق ذلك عند درجات حرارة منخفضة نسبياً، مقارنةً بدرجة الحرارة العالية اللازمة للحام بالخلائط المعهودة، فإنه يمكن صنع الإلكترونيات الحساسة بسهولة.

وجاء في تقرير للمعهد الوطني لعلوم المواد في اليابان (National Institute for Materials Science)، أن فولاذاً مرتنزيتياً مخلوطاً مع الكروم بنسبة 9 في المئة، ومقوى بجُسيْمات نانوية من نيتريد الكربون، يحتاج من أجل أن يتمزق عند درجة حرارة تساوي 650 مْ إلى مدة أطول بمرتبتي أكبَر مما تحتاجه الخليطة المعهودة ASME-P92، التي تُعدُّ أقوى فولاذ متوفِّر اليوم لمكوِّنات المراجل.

يمتلك هذا الفولاذ طاقة صدم تشاربي (Charpy) تساوي 100 ـ 150 جول عند درجة حرارة الغرفة. ويُعزى تحسُّن مقاومته للزحف إلى آلية تثبيت لحدود الجُسيْمات بواسطة جُسيْمات نيتريد الكربون المستقر حرارياً. وفقاً لقول الباحث فوجيو أبه (Fujio Abe)، حصل انتشار جُسيْمات نيتريد الكربون النانوية المقاس نتيجة تخفيض مستوى الكربون حتى 0.002 في المئة.

صُمِّم هذا الفولاذ بوصفه نتيجة برنامج لتحديد التركيب الأمثلي للفولاذات التي تستطيع مقاومة الزحف عند درجات الحرارة العالية. وقد كانت تراكيب الفولاذات التي استُقصيت في الدراسة قائمة على الخليطة Fe-9Cr-3W-3Co-0.2V-0.06Nb-0.05N (نسب وزنية)، مع نسب مختلفة من الكربون: 0.002، 0.018، 0.120، 0.160 وحُضِّرت الفولاذات باستخدام التحريض الكهربائي في الخلاء، حيث جرى صهر سبائك وزنها 50 كغ. وجرى فحص مقاومة الفولاذات للشدّ

عند درجات حرارة عالية بواسطة اختبارات الزحف عند 650 مْ تحت حمل ثابت مدة تصل حتى 000 10 ساعة، وذلك باستخدام عيّنات أقطارها تساوي 10 ملم، وأطوالها تساوي 50 مم.

وُجد أن عدداً كبيراً من الجُسيْمات الدقيقة المترسبة التي تقع مقاساتها في المجال 5 ـ 10 نم موزَّع على طول الحدود الحُبيْبية التي كانت قبل الطَور الأوستنيتي، وعلى طول الحدود الشريحية واللبِنية والرزمية في عيّنة تحتوي على 0.002 في المئة من الكربون بعد معالجة إرجاع (Tempering) حرارية. وعُرِّفت الجُسيْمات بأنها نيتريدات كربون MX، حيث M هي عنصر خليطة معدني وتشير X إلى الكربون والنيتروجين.

لقد طُوِّرت فولاذات أخرى كي تتحمل الزحف عند درجات حرارة عالية بتوزيع جُسيْمات دقيقة خلال الحاضنة، لكن إنتاجها معقد ومرتفع التكلفة. أما الفولاذ الجديد المذكور آنفاً فيمكن أن يُنتَج بتكلفة اقتصادية باستعمال تقنيات المعالجة المعتادة، ويمكن لتطويره أن يؤدّي إلى تصنيع أرخص واسع النطاق لمكوِّنات فولاذية مقاومة للزحف تُستعمل في التطبيقات العالية الحرارة كتلك التي في محطات توليد الطاقة[92].

واكتشف العلماء اليابانيون خلال ثمانينيات القرن العشرين أنه يمكن تحسين الخواص الميكانيكية للسيراميكات بإضافة جُسيْمات SiC إليها (تقع مقاساتها بين 100 و200 نم). وأكَّد عمل لاحق، في جامعة لاهاي برعاية من الـ EPRI ومكتب البحوث البحرية الأميركي (Office of Naval Research)، هذا الاكتشاف وسلَّط ضوءاً جديداً على الآلية المحتملة لهذا التحسين. تنزع السيراميكات إلى أن تكون هشة بوجه عام: حين حَنْيِها، تنكسر بسهولة على طول عيوبها السطحية من دون حصول تشوّه فيها. وقد وجد الباحثون في لاهاي

أن وجود جُسيْمات الـ SiC النانوية يسهِّل على ما يبدو التئام الصدوع في سطح السيراميك في أثناء التطرية الحرارية، وهذا ما يجعل السطح أقوى. في المقابل، تجعل التطرية الحرارية لمادة سيراميكية وحيدة الطَور صدوع السطح تنمو عملياً. ووفقاً لآخر النتائج، تُبدي المواد النانوية المركَّبة المكوَّنة من السيراميك والـ SiC زيادة ملحوظة في مقاومة التمزق عند درجات الحرارة العالية، مقارنة بالسيراميكات الوحيدة الطَور. يُضاف إلى ذلك أن معدل الزحف في تلك المواد ينخفض بأكثر من مئة مرة. وتُري النتائج أيضاً زيادة كبيرة في مقاومتها للكشط.

وفي بحث آخر يخص جُسيْمات السيراميك النانوية، طوَّر علماء جامعة أوساكا بلورة فوتونية (Photonic Crystal) باستعمال جُسيْمات نانوية سيراميكية مركَّبة ذات عامل عزل كهربائي عالٍ منتشرة ضمن شبكات راتنج الإيبوكسي.

طُوِّر الجُسيْم المركَّب بالربط الميكانيكي الكيميائي، وهو يتصف بعامل عزل كهربائي أكبر بـ 50 في المئة من ذاك الخاص بالجُسيْمات الدقيقة الأخرى، وهذا ما يساعد على تصغير فواصل الشبكة بمقدار 20 في المئة.

واستُخدمت هذه الجُسيْمات المركَّبة النانوية في نظام نمذجة بصرية يولِّد بلَّورة فوتونية، وهي شبكة اصطناعية يُتوقَّع أن تمهد الطريق أمام تطوير مُحِسَّات راديوية عند تردّدات من رتبة التِّرا هرتز ($10^{12}$ هرتز)، وتجهيزات اتصالات كبيرة السعة في مجال الأمواج الميليمترية.

وضع المهندسون في معهد جورجيا التقاني «كتاب وصفات» لكيفية صنع جُسيْمات نانوية ذات خواص مغنطيسية محدّدة. والغرض منه هو تطوير أدوات تشخيص ومعالجة للأغراض الطبية. على سبيل

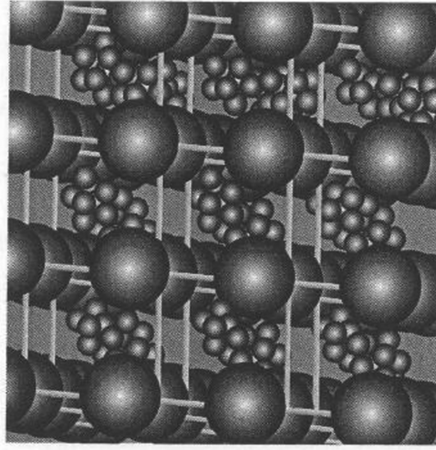
المثال، يمكن للجُسيْمات النانوية المغنطيسية أن تحمل الدواء إلى منطقة معيّنة في الجسم، حيث تقوم حقول مغنطيسية بقيادتها وتوجيهها. ويمكن للجُسيْمات المغنطيسية أن تحسِّن أيضاً التباين في صور الرنين المغنطيسي. ويمكن لمغانط صغيرة أن تقتفي الأثر وتحل محل الطرائق الإشعاعية الحالية المستخدمة في تعقب الدواء في الجسم.

ويحاول أولئك الباحثون أيضاً تجاوز عقبات عدة، ومنها صنع جُسيْمات نانوية منخفضة الطاقة تسمح بتغيّرات ثابتة في حالاتها المغنطيسية. فنظراً إلى أن المتعاكسات المغنطيسية تتجاذب، فإنه يمكن للجُسيْمات أن تتجمَّع معاً في الجسم، وأن توقف تدفق الدم. أما الجُسيْمات التي تتغيَّر حالاتها المغنطيسية بسرعة، فلا تتجمع، ولا تؤدّي إلى مشاكل. والعقبة الثانية هي المقاس. يجب أن تكون الجُسيْمات صغيرة بقدر يكفي لمنع نظام المناعة في الجسم من كشفها، وكبيرة بقدر يكفي لتبقى في الجسم وتدور ضمن تيار الدم. ويجب أن تكون أيضاً متناسقة لأن الخواص المغنطيسية تابعة للحجم. لقد أنتج فريق جورجيا مغانط نانوية ذات مقاسات لا تزيد الفروق بينها على 15 في المئة، وهو يأمل بمزيد من التقليص لتلك الفروق.

وأعلن علماء من جامعة كولومبيا، والشركة IBM، وجامعة نيو أورليانز أخيراً مادة تصميم جديدة ثلاثية الأبعاد مجمَّعة من نوعين مختلفين من الجُسيْمات، يساوي قطر الواحد منها بضعة نانومترات فقط[93].

فقد طوَّروا طرائق كيميائية دقيقة لتحديد مقاسات الجُسيْمات بتزايدات تقل عن 1 نم، ولتهيئة الظروف التجريبية التي تسمح للجُسيْمات بالتجمُّع ذاتياً في أنماط متكررة ثلاثية الأبعاد (انظر الشكل 5 ـ 17). وتصميم مواد جديدة، تسمّى أحياناً المواد الفائقة (Metamaterials)، ذات خواص لا يمكن الحصول عليها بطرائق

أخرى، هو واحد من بشائر التقانة النانوية. لقد كُوِّنت سابقاً أنماط ثنائية الأبعاد من جُسيْمات ذهب نانوية ذات مقاسات مختلفة، ومن مزائج من الذهب والفضة. وتوسيع هذا المفهوم إلى الأبعاد الثلاثة، مع أنواع مختلفة من المواد، يري قابلية جمع مزيد من المواد معاً أكثر من ذي قبل.



**الشكل 5 ـ 17: رسم توضيحي لشبكة فائقة ذاتية التجميع، ثنائية النمط من البلورات النانوية. تتكوَّن الشبكة الفائقة من بلورات أكسيد الحديد النانوية الفائقة المغنطة المسايرة على شكل صفيفة تكعيبية، مع عشريني سطوح منتظم مكوَّن من 13 بلورة نصف ناقلة من سلينيد الرصاص في مركز كل مكعب (البلورة النانوية الثالثة عشرة من سلينيد الرصاص موجودة في مركز عشريني الوجوه المنتظم).**

«إن أشدّ ما يثيرنا هو أن هذه هي طريقة تجميع نسائقي سوف تمكِّننا من جمع أي مواد تقريباً معاً، يقول كريستوفر مورّاي (Christopher Murray)، في مختبرات بحوث شركة IBM. «لقد عرضنا إمكان جمع مواد متتامة معاً وفي الذهن إيجاد مواد ذات خواص مثيرة مفصّلة وفق الحاجة».

اختار العلماء مواد خصيصاً للتجربة ذات خواص مختلفة، لكن متتامة. فسلينيد الرصاص هو نصف ناقل، له تطبيقات في كواشف الأشعّة تحت الحمراء والتصوير الحراري، ويمكن توليفه ليصبح أشدّ حساسية لأطوال موجات تحت حمراء معيّنة. والمادة الأخرى، أُكسيد الحديد المغنطيسي، معروفة جيداً باستخدامها في طلاءات وسائط التسجيل المغنطيسية.

إن مزيج هذه الجُسيْمات النانوية يمكن أن يمتلك خواص بصرية مغنطيسية جديدة، إضافة إلى خواص تُعتبر مفتاحية لتحقيق الحوسبة الكمومية. على سبيل المثال، قد يكون من الممكن تعديل خواص المادة البصرية بتطبيق حقل مغنطيسي خارجي عليها.

الخطوة الأولى في ذلك الاتجاه هي تكوين الجُسيْمات النانوية. لقد حُسبت أحجام الجُسيْمات من المجموعة الرياضية الممثلة للبنى التي يجري تكوينها. وإضافة إلى التوليف الدقيق للمقاسات، كان على الجُسيْمات أن تكون شديدة التجانس، وألاّ تختلف مقاساتها عن المقاس المفترض بأكثر من 5 في المئة. لقد جرى أولاً تكوين جُسيْمات من أُكسيد الحديد أقطارها تساوي 11 نم، وجُسيْمات من سلينيد الرصاص أقطارها تساوي 6 نم. ثمة نحو 000 60 ذرّة في جُسيْم أُكسيد الحديد النانوي، ونحو 3000 ذرّة في جُسيْم سلينيد الرصاص.

بعدئذٍ جرى تجميع الجُسيْمات النانوية، أو بعبارة أدق، جُعلت تُجمِّع نفسها ذاتياً في ثلاثة أنماط ثلاثية الأبعاد متكررة مختلفة، وذلك من خلال تفصيل ظروف التجربة. إن تكوين هذه البُنى، المسماة «بنى بلّورية» لتمييزها من مزيج الجُسيْمات النانوية العشوائي، جوهري كي تُبدي المادة المركَّبة سلوكاً متناسقاً قابلاً للتوقّع. ثمة مواد أخرى معروف أنها تتجمع تلقائياً في بُنى ذات جُسيْمات متراصة، إلا أنه لم تُصنع أي مادة قط ثنائية المكوِّنات ثلاثية الأبعاد، وبسلّم المقاسات نفسه. لقد طُوِّرت طرائق كيميائية دقيقة بغية توليف

مقاسات الجُسيْمات بتزايدات تقل عن 1 نم، وفُصِّلت ظروف التجربة بحيث تجمِّع الجُسيْمات نفسها في أنماط متكررة ثلاثية الأبعاد.

أخيراً، يمكن لجُسيْمات نانوية مغلَّفة، تتكوَّن من الغرافيت في أثناء تبخيره بقوس كهربائية قطباها من التنغستين، أن تُستخدم في التصوير بالرنين المغنطيسي وفي معالجة السرطان، وفق قول مكتشفيها، وهم فريق من علماء ومهندسي المواد في جامعة نورثوسترن (Northwestern). تستطيع هذه الكريَّات المحكمة الإغلاق، المسماة محافظ بَكِّي (Buckycapsules)، والتي تشابه أنابيب بَكِّي، أن تتحرك في الجسم من دون تعريض الشخص للنوى المعدنية المغلَّفة بالمحافظ.

## المساحيق النانوية

### طرائق تصنيع المساحيق

#### توضيع الأبخرة كيميائياً

يمكن صنع مساحيق سيراميكية نانوية الطَور ذات نقاوة تقع بين 95 و99.999 في المئة بسيرورة لتوضيع الأبخرة كيميائياً، يُستخدم فيها ليزر ثاني أُكسيد الكربون، بقدرة تساوي 5 كيلو واط. تتصف المساحيق المنتجة بالليزر بأقطار مسيطَر عليها وبدرجة عالية من الكروية. ويُحسِّن مقاس الجُسيْمات الدقيق تشكيل المادة بالكبس الساخن. وتتصف المساحيق ذات الأقطار المسيطر عليها التي تقل عن 20 نم، بأن نسبة أكبر قطر فيها إلى أصغر قطر تقل عن 2، وبمساحة سطحية تساوي 109 م$^2$/غ، إضافة إلى خلوِّها من التكتُّل. وقد أنتجت إحدى الشركات التي تستخدم هذه الطريقة مساحيق عدة نانوية الطَور أخيراً، منها SiN، SiC، SiCN، BN، SiO.

يمكن استخدام المواد النانوية الطَور في المكوِّنات التي تهترئ في محرّكات الاحتراق الداخلي. ويتصف مسحوق نيتريد الحديد النانوي بخواص مغنطيسية فائقة، وهو مرشح للاستخدام في نظم خزن البيانات المغنطيسية، والتجهيزات البصرية المغنطيسية، والمغانط الكبيرة.

### التحضير الكيميائي ليزرياً

يُعدُّ التفكيك الكيميائي حرارياً بواسطة ليزر الأشعّة تحت الحمراء طريقة غنية لإنتاج طيف واسع من المساحيق النانوية، ومن أمثلتها الـ SiC، SiCN، BN، SiCO، C.

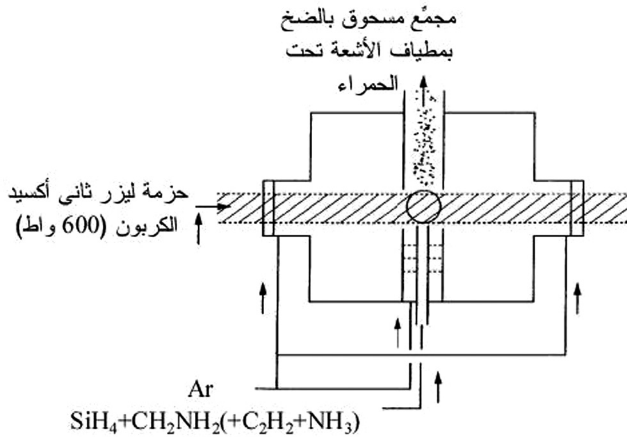
ويُعتبر التفكيك الكيميائي ليزرياً طريقة ملائمة جداً لإنتاج مقادير كبيرة من المساحيق النانوية القائمة على السليكون. ونظراً إلى خصائص هذه المساحيق النانوية (نقاوة محدّدة فقط بنقاوة المواد المتفاعلة، جُسيْمات منتشرة صغيرة الحجم... إلخ)، فإنها تُعتبر مرشحة جيدة للتطبيقات السيراميكية. يمكن صنع هذه المساحيق من مواد أولية غازية أو سائلة، والمساحيق التي تُصنع من طَور غازي تتبلور، في حين أن تلك التي تُصنع من طَور سائل لا تتبلور. وفي كلتا الحالتين، جرى التحكُّم بالتركيب الكيميائي للمساحيق بالتركيب الكيميائي لمزيج التفاعل. أخيراً، إحدى النتائج المهمة كانت تضمين المسحوق عناصر مساعدة على التلبيد (Al، Y، O) في أثناء التحضير[94]. يُبيّن الجدول 5 ـ 3 ملخّصاً لتحضير مساحيق من تفكيك مواد مختلفة.

## الجدول 5 ـ 3: مساحيق نانومترية محضّرة بليزر ثاني أُكسيد الكربون

| المسحوق | المنظومة الكيميائية | المراجع |
|---|---|---|
| Si | $SiH_4$ | Haggerty and Cannon 1981; Cauchetier et al. 1987 |
| SiC | $SiH_4 + C_2H_4$<br>$SiH_4 + C_2H_2$<br>$SiH_4 + C_xH_y$ , $x=4$<br>$SiH_2Cl_2 + C_2H_4$<br>$(CH_3)_2Si(C_2H_5O)_2$ بخار | Sumaya et al. 1985; Cauchetier et al. 1987; Forster et al. 1991 Cauchetier et al. 1987; Curcio et al. 1989; Fantoni et al. 1990; Tougne et al. 1993 Cauchetier et al. 1988 Suzuki et al. 1992 Li et al. 1994a |
| $Si_3N_4$ | $SiH_4 + NH_3$<br>$SiH_2Cl_2 + NH_3$ | Haggerty and Cannon 1981; Kizaki et al. 1985; Symons and Danforth 1987; Buerki et al. 1990 Bauer et al. 1989 |
| $SiC + Si_3N_4$ or Si/C/N | $[(CH_3)_3Si]_2NH$ بخار<br>$SiH_4 + CH_3NH_2 + NH_3$<br>$SiH_4 + (CH_3)_2NH + NH_3$<br>$SiH_4 + C_2H_4 + NH_3$<br>$(CH_3SiHNH)_x$, $x=3$ or 4 هباب<br>$[(CH_3)_3Si]_2NH$ هباب | Rice 1986; Li et al. 1994b Cauchetier et al. 1989; Cauchetier et al. 1991 Alexandrescu et al. 1991; Borsella et al. 1992 Suzuki et al. 1993 Gonsalves et al. 1992 Cauchetier et al. 1994; Herlin et al. 1994; Musset et al. 1997 |
| $SiO_2$ | $Si(C_2H_5O)_4$ هباب | Luce et al. 1994 |
| $SiO_2 + SiC + C$ or Si/C/O | (RO)4-xSi(R')x, $0 < x < 3$,<br>$R = C_2H_5O$, $R' = CH_3$<br>& $[(CH_3)_3Si]_2O$ هباب | Armand et al. 1995; Martinenggo et al. 1996; Herlin et al. 1996; Fusil et al. 1997 |
| BN | $BCl_3 + NH_3$ | Luce et al. 1993; Baraton et al. 1994; Willaime et al. 1995 |
| $B_4C$ | $BCl_3 + CH_4 + H_2$<br>$BCl_3 + CH_2 + H_2$ | Kundsen 1987a Luce et al. 1993 |
| $TiB_2$ | $TiCl_4 + B_2H_6$<br>$TiCl_4 + BCl_3 + H_2$ | Casy and Haggerty 1987a Kundsen 1987b |
| $ZrB_2$ | $Zr(BH_4)_4$ | Cauchetier et al. 1987; Rice and Woodin 1988 |
| $TiO_2$ | $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ | Casy and Haggerty 1987b; Rice 1987; Curcio et al. 1991 |
| TiC | $TiCl_4 + C_2H_4$ | Alexandrescu et al. 1997 |
| $Al_2O_3$ | $Al(CH_3)_3 + N_2O + C_2H_4$ | Borsella et al. 1993 |
| WC | $WF_6 + C_2H_2 + H_2 + SF_6$ | Bourgeois et al. 1995 |

في سيرورة التفكيك الكيميائي بالليزر تحت الأحمر، تُسخَّن المواد المتفاعلة بأشعّة ليزرية تحت حمراء، فتتفكَّك مؤدية إلى تنوِّي

الجُسيْمات ونموها سريعاً. إن هذه السيرورة بطبيعتها نظيفة جداً لأن التنوِّي المتجانس يحصل في منطقة تفاعل محدّدة تماماً من دون التفاعل مع جدران حجرة التفاعل. وحيّز التفاعل الصغير، وإمكان الإبقاء على تدرُّج حراري شديد الميل ($10^6$ مْ/ ثا) يسمحان بالتحكّم الدقيق بمعدل التنوِّي ومعدل النمو، وفي مدة البقاء في قيد التفاعل. ويمكن التحكُّم بالخواص الفيزيائية والكيميائية للجُسيْمات بتغيير المواد الأولية الجُزَيئية وموسّطات التركيب (استطاعة الليزر، الضغط. . . إلخ). أما المساحيق الناتجة فهي دقيقة جداً، وكروية وشديدة النقاوة، ومتكتِّلة إلى حد ما، وذات توزُّع مقاسات ضيق، إضافةً إلى أنه يمكن ضبط مقاس الجُسيْم الوسطي ليكون بين 10 و100 نم. إن هذه الخصائص جميعاً (مقاس أصغر من 100 نم، شكل كروي، توزع مقاسات ضيق، تكتل محدود، نقاوة عالية) تجعل المساحيق الليزرية مرشَّحات جيدة للاستعمال في السيراميكات (انظر الشكل 5 ـ 18).




**الشكل 5 ـ 18: مخطط توضيحي لخلية إضاءة ليزرية لاستخدامها مع المواد الأولية الغازية**[95].

منذ تحضير مسحوقي الـ Si و$Si_3N_4$، غدا إنتاج المساحيق الفائقة النعومة، من متفاعلات غازية، تطبيقاً ليزرياً مبتكراً في الكيمياء. صحيحٌ أن استخدام ليزر الـ $CO_2$ في تحضير المساحيق المستخدمة في السيراميكات هو سيرورة جديدة مقارنة بسيرورتي البلازما أو المحلول ـ هلام، إلا أنها تبدو واعدة جداً، وقد تم تطويرها في بلدان عدة: في أوروبا (فرنسا، إيطاليا، هولندا، ألمانيا) واليابان والصين.

تتطلب تقنية التحضير بالليزر وجود مواد تمتص الأشعّة الليزرية من قبيل $SiH_4$. وقد استُخدمت هذه المادة الأولية على نطاق واسع للحصول على مساحيق سيراميكية قائمة على السليكون (انظر الجدول 3,5).

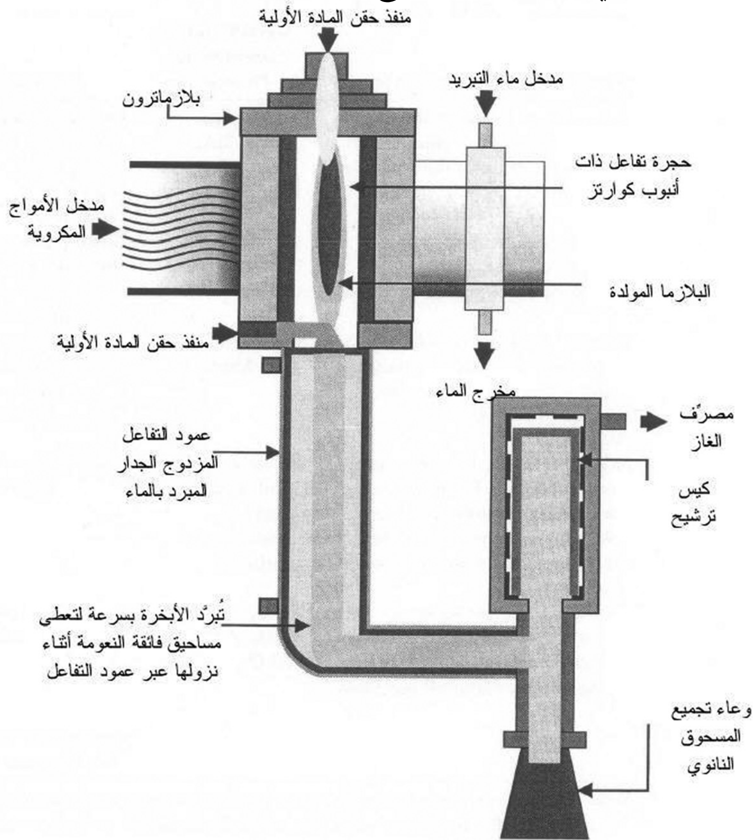
وصل معدل إنتاج الـ SiC في المخبر إلى 100 غ/ساعة أو أكثر، ويُقدَّر أن تطوّر السيرورة لتصبح في مستوى مشروع يُعطي 1 ـ 10 كغ/اليوم.

## نقل طاقة الأمواج الميكرويّة

في عام 1995، بدأ كروباشانكارا[96](Krupashankara) النظر في الأمواج الميكرويّة باعتبارها وسيلة بديلة لاستخدامها في إنتاج المواد المركَّبة النانومترية بكميات كبيرة وكفاءة عالية (انظر الجدول 5 ـ 4). وكان الغرض من هذا العمل صنع لوح تدريع خفيف الوزن للحماية من المقذوفات.

تتصف المساحيق النانوية بنسبة مساحة سطح إلى حجم عالية: أكبر بنحو 45 مرة، في حالة جُسيْمات الحديد التي تساوي أقطارها 20 نم، من تلك التي للمسحوق الذي تقل أقطار جُسيْماته عن 1 ميكرون قليلاً. وتوفِّر المواد المصنوعة من مساحيق نانوية معدنية، أو

سيراميكية للصناعات الجوية والفضائية، ولصناعة السيارات، على سبيل المثال، لدانة فائقة، فهي يمكن أن تحقِّق استطالة تتراوح بين 100 و1000 في المئة قبل أن تنقطع.




**الشكل 5 ـ 19: يتطلب ترابط الأمواج الميكروية مع المادة التوافق مع خواص المادة الكهربائية والمغنطيسية. وتحدِّد مدة وجود المادة الأولية في البلازما وظروف التبريد مقاسات الحُبيْبات.**

## الجدول 5 ـ 4: بعض الوصفات للمساحيق النانوية

| طريقة تحضير المسحوق النانوي | المسحوق النانوي المعدني أو السيراميكي الناتج | مثالب الطريقة |
|---|---|---|
| طحن بالكرات/سحق ميكانيكي تخضع جُسيْمات المسحوق إلى تشوّه ميكانيكي شديد | Fe, Co, Ni, NiAl, TiAl, FeSn | تلوث المسحوق بسبب معدل الإنتاج المنخفض بواسطة كرات الفولاذ: 1 ـ 5 غ/سا |
| حت بالليزر | AlN, $MnO_2$, $TiO_2$, Ti | معدل إنتاج منخفض: 0,01 غ/سا، استهلاك عالي للطاقة |
| ترذيذ: منبع تيار مستمر أو تردّدات راديوية يُبخّر المادة عوضاً عن الليزر المستخدم في الحتّ الليزري | Al, Cu, Mn | توزُّع عريض لمقاسات الجُسيْمات، 6 ـ 8 في المئة فقط من المادة المرذذة مقاسها أصغر من 100 نم، معدل إنتاج 4 ـ 5 غ/سا |
| ترسيب كيميائي: تُمزج مادتان أو أكثر مع محفِّز تفاعل لتكوين هلام. يُجفف الهلام ويُرجع بوجود $H_2$ لتكوين مسحوق نانوي. | SiC, $BaTiO_3$, W-Cu, Mo-Cu | معدل إنتاج: 10 ـ 50 غ/اليوم، تكتل المسحوق وتأكسده بسبب استخدام مواد أولية كيميائية سائلة. |
| بلازما التحريض: يُشرِّد مولد تردّدات راديوية البلازما. تصل درجة الحرارة حتى 10 000 مْ. تُدخل المواد إلى مبخِّر البلازما، وتتكاثف كجُسيْمات نانوية على جدران الحجرة. | Fe, AlN, Cu وبوريدات ونيتريدات وكربيدات معدنية | استهلاك عالٍ للطاقة، مردود أقل من 50 في المئة عموماً. |
| بلازما أمواج ميكرويّة (Nanogen): تولِّد الأمواج الميكرويّة البلازما التي تنقل الحرارة اللازمة للتفاعلات الكيميائية. | Fe, Co, Mo, Ni, $TiO_2$, $ZrO_2$, $Al_2O_3$ | إيصال طاقة الأمواج الميكرويّة إلى سطوح الجُسيْمات المعدنية صعب. درجات الحرارة التي تصل إلى 1500 مْ تحد من اختيار المواد الأولية. |

المعلومات من الشركة: Materials Modification Inc.

**ملاحظة**: توفّر سيرورة بلازما الأمواج الميكرويّة (Nanogen) معالجة عند الضغط الجوي للمعادن والسيراميكات ومتعدّدات المعادن بمعدّلات تصل حتى 1 كغ/اليوم، وهي معدّلات أعلى مما توفّره الطرائق الأخرى[96].

صحيحٌ أن الطرائق السابقة تمكِّن من تصنيع مساحيق الأكاسيد والكربيدات النانوية عملياً، إلا أن إنتاج المساحيق المعدنية الصافية بها يمثل مشكلة بسبب تفاعلها مع الغازات الجوية، وبسبب حدوث اشتعال شديد حين التعرُّض إلى الهواء في بعض الحالات. يُضاف إلى ذلك أن التقنيات السابقة تتصف أيضاً بمعدّلات إنتاج منخفضة من رتبة 50 غ/اليوم.

أما طريقة Nanogen™ القائمة على الأمواج الميكرويّة التي طورَّها كروباشانكارا وزميله المهندس راجا كاليانارامان (Raja Kalyanaraman) «فتوفِّر مزية مزدوجة: تسخين المادة مباشرة وتوفير مغلف غازي عالي الحرارة لتسهيل المعالجة الكيميائية والحرارية»، يقول كروباشانكارا. يُبثِّر النظام أمواجاً ميكرويّة (6000 واط عند 2450 ميغا هرتز) في دليل موجة (انظر الشكل 5 ـ 19)، وتسمح حجرة تفاعل ذات جدران من الكوارتز للأمواج الميكرويّة من الدخول إليها والترابط مع مواد التفاعل الأولية المحقونة في الحجرة. فيحصل حينئذٍ تفرُّق وتفكُّك وانصهار أو تبخُّر للمواد المتفاعلة. يقول كروباشانكارا إن سماحية المادة (من حيث العزل الكهربائي)، ونفاذيتها (التحريض المغنطيسي مقسوماً بشدّة الحقل) هما خاصيتان مفتاحيتان تحكمان ترابط الأمواج الميكرويّة مع المواد في حجرة التفاعل، أو البلازماترون (Plasmatron).

تسهِّل البلازما الناتجة، عند درجات حرارة تصل إلى 1500 مْ، تكوُّن جُسيْمات ذات مقاسات قريبة من المقاسات الذريّة بمجرد دخول البلازما «عمود تفاعل» مزدوج الجدار يُبرَّد بالماء. ويضمن التحكُّم بمدة بقاء المتفاعلات ضمن البلازما التحويل الكامل. وتُولَّف مدة البقاء في البلازما ومعدّل التبريد بتغيير موسّطات من قبيل ضغط المتفاعلات الجزئي، وتدفق الغاز، ودرجة الحرارة التي تؤثِّر أيضاً في مقاسات حُبيْبات الجُسيْمات وتوزُّعها.

بعدئذٍ، يفصل كيس ترشيح، يمكنه تحمُّل 700 مْ، الجُسيْمات النانوية من تيار الغاز المطرود، فتتساقط في حاوية أو قارورة في الأسفل. تقلِّص هذه التعبئة المباشرة بالقوارير التلوث السطحي. واعتماداً على نوع المادة، فإن دخولاً بطيئاً للهواء، أو لغاز مخصَّص لهذه الغاية، سوف يبرِّد المسحوق بسرعة بتكوين غطاء رقيق واقٍ لدرء أي اشتعال تلقائي. أو يمكن إحكام سد حاويات المسحوق في جو من الأرغون أو النيتروجين بغية خزنه. حالياً، يمكن إنتاج ما يصل إلى 1 كغ من المسحوق النانوي في اليوم.

يقول كروباشانكارا: «إن الاستخدام الحقيقي للمساحيق النانوية هو في صنع قطع متنوعة الأشكال». وثمة تطبيقات أخرى لها من قبيل:

- مرشحات لفصل الكيماويات والتنقية.
- طلاءات تقوية مقاومة للاهتراء.
- محفِّزات تسريع للتفاعلات الكيميائية.
- مُجِسَّات للكيماويات الحيوية.
- عوامل ملوِّنة للأصبغة ومواد التجميل.

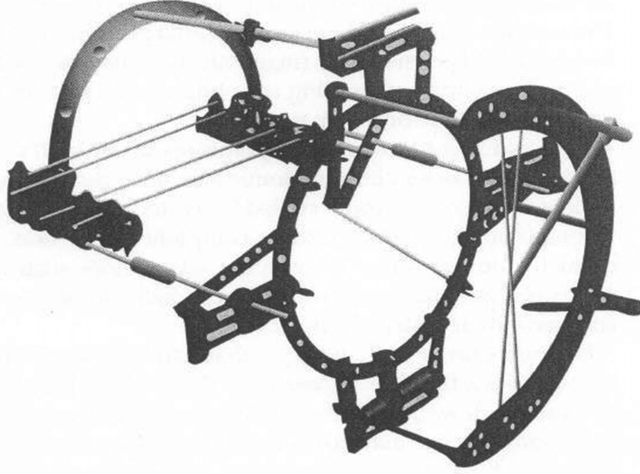
### الخلط الميكانيكي

جرى خلط مساحيق الـ Cu والـ NbC ميكانيكياً مع الغرافيت أو الهكسان لتكوين مساحيق نانوية مركَّبة من Cu-Nb-C. وصُلِّدت هذه المساحيق بالكبس الحار المتساوي الضغط عند درجة حرارة تساوي ثلث درجة حرارة انصهار الـ NbC لتكوين مادة متراصة بكثافة تساوي 10 في المئة، مع الحفاظ على مقاس البُلَيْرة ضمن السلّم النانوي[97].

### التشويه اللّدن الشديد

تُخضِع التقنية المسماة بالتشويه اللّدن الشديد المواد والخلائط

إلى إجهادات شديدة تكسِّر، أو تنقِّح، الحُبيْبات المحمَّلة بما يزيد على 400 طن/ إنش$^2$. وتُضم هذه الأحمال الكبيرة إلى انفعالات فتل، أو إلى طرائق كبس أخرى لإنتاج مواد ذات مقاومة للشدّ ومتانة استثنائيتين. حينئذٍ، يمكن للسيراميكات الهشة أن تصبح عديمة المسامات، وقابلة للتطريق والكبس ضمن ظروف معيّنة عند تشكيلها من تلك المساحيق النانوية. والمواد المصنوعة بهذه الطريقة من مساحيق معدن نانوية، من قبيل النحاس والحديد والفضة والألمنيوم والتيتانيوم، أقوى بما يصل إلى 10 مرات من نظيراتها المصنوعة بالطرائق العادية.



**الشكل 5 ـ 20: مثبت التجبير هذا هو واحد من أولى التجهيزات التي صُنعت من التيتانيوم بتقانة المسحوق النانوي.**

في هذه السيرورة، تُصنع مكوِّنات صناعية وحيوية ميكانيكية شديدة المقاومة للشدّ من مساحيق معدنية أو سيراميكية أو مركَّبة فائقة النعومة. يقول إميل سترومبان[(98)] (Emil Strumban): «تتصف المواد المصنوعة بهذه الطريقة بأداء أفضل وعمر أطول على نحو ملحوظ.

وقطع الألمنيوم التي تُصنع من مساحيق فائقة النعومة سوف تكون أقوى كثيراً من تلك المصنوعة من حُبيبات الألمنيوم الكبيرة، وسوف تعيش أدوات القطع الفولاذية المصنوعة من حُبيْبات فائقة النعومة عمراً أطول بعدة مرات».

يمكن لهذه السيرورة الجديدة التي تُجهد وتُكسِّر المساحيق النانوية، أن تُنتج مكوِّنات لتجبير العظام استثنائية القوة (انظر الشكل 5 ـ 20)، وقطعاً أقوى للسيارات والطائرات والمرْكَبات الفضائية، وأن تُحسِّن أداء كثير من المواد المعهودة.

وإضافة إلى صنع المكوِّنات، ثمة تطبيقات محتملة أخرى منها أنواع جديدة من أغشية المرشِّحات، وشفرات القص وريش التثقيب، ومواد وصل القطع السيراميكية، والمحامل العالية الأداء، والمواد غير السليكونية للعناصر الفاعلة وغير الفاعلة في الدارات المتكاملة، والمغانط الفائقة لزيادة كفاءة المحرّكات الكهربائية.

**الطحن بالكرات العالي الطاقة**

أُعلن أخيراً أنه يمكن تحضير المعادن والخلائط النانوية البلّورات بالتشغيل الميكانيكي لمساحيق عنصرية، أو بالخلط الميكانيكي لمزائج المساحيق في طاحونة كرات عالية الطاقة[(102)(99)]. تقوم هذه الدعاوى بمعظمها على تحليل أشكال ذرى انعراجات الأشعّة السينية المتوسِّعة. من المعروف أن تشغيل المعادن والخلائط على البارد يؤدّي إلى توسُّع قمم أشكال المسحوق بسبب الانفصامات التي تحصل في أثناء سيرورة التشويه. والطحن بالكرات العالية الطاقة هو تشغيل على البارد يمكن لقيمة الإجهاد العظمى فيه أن تصل إلى 50 كيلو بار[(103)].

لقد جرى تشغيل مساحيق ميكرويّة من الحديد والتنغستين والنيكل ـ ألمنيوم ميكانيكياً في طاحونة كرات عالية الطاقة فترات

وصلت حتى 100 ساعة[104]. وكان طحن مساحيق التنغستين والحديد والنيكل ـ ألمنيوم بواسطة طاحونة الكرات طريقة فاعلة أيضاً لإنتاج مواد أبدت أنماط الانعراج فيها توسيعاً كبيراً للقمم. وبرغم أن مقاسات جُسيْمات المسحوق الإفرادية بقيت من رتبة 1 ـ 2 ميكرون، فإن مقاس الحُبيْبة ضمن الجُسيْم انخفض إلى السلّم النانومتري.

## التكثيف والمعالجة

تُعتبر المساحيق النانوية البنية فئة جديدة من المواد التي تتميز بأن المقاس الوسطي لحُبيْباتها، أو لمعالمها البنيوية الأخرى، يقل عن 100 نم. وضمن مجال المقاسات هذا، تغيِّر مفاعيل الحبس (Confinement) المتنوِّعة كثيراً من خواص المادة، وتقود تلك المفاعيل إلى خصائص عدّة مفيدة تجارياً. ومن وجهة نظر المعالجة، توفّر المساحيق النانوية البنية إمكانات أيضاً لمعدّلات تلبيد عالية عند درجات حرارة منخفضة.

تُستخدم في إحدى التقنيات السريعة للتكثيف مساحيق نانوية البنية لإنتاج تجهيزات ومكوِّنات سيراميكية. توفِّر هذه التقنية قطعاً ومواد مركَّبة سيراميكية يمكن استخدامها في مجالات السيارات والطاقة، والتطبيقات الكهروكيميائية والمغنطيسية والإنشائية والطبية الحيوية، وفي الحوسبة ونقل المعلومات، وفي منع التلوّث والسيطرة عليه.

مُزجت في هذه الطريقة مساحيق سيراميك نانوية، مقاسات جُسيْماتها تقل عن 100 نم، مع مساعد تلبيد نسبته الوزنية تقل عن 5 في المئة، وكُبست على البارد على شكل أقراص، ولُبِّدت من دون ضغط عند 1400 و1600 مْ. لقد خُلِّيت بيئة التلبيد لإزالة الأُكسجين، وأُبقيت في حالة التخلية تلك. وعولجت مساحيق سيراميك ميكرويّة المقاس لها التركيب نفسه أيضاً باتباع المراحل نفسها، وفي ظروف مشابهة.

إن تكثيف المادة السيراميكية المتراصة، أو تلبيدها، هو سيرورة لإزالة المسامات من بين الجُسيْمات البادئة، يرافقها نمو رابط قوي بين الجُسيْمات المتجاورة. أما القوة الدافعة للتكثيف فهي إنقاص المساحة السطحية، وتخفيض الطاقة السطحية بإلغاء ملتقي الحالتين الصلبة والبخارية.

بغية نقل مفهوم هذه التقانة الجديدة إلى الواقع العملي، ركَّز مخترعاها، ينغ [105] ويادوف، اهتمامهما في مواد مركَّبة من الـ SiC المقوّاة بألياف الـ SiC المستمرة. وأنتجا مساحيق سيراميك نانوية، وشكَّلاها على شكل كتل صلبة، ونثرا تلك الكتل الصلبة خلال الألياف بعدة طرائق مختلفة. ورُصَّ الناتج رصّاً متوازناً، ثم أخضع للكبس الحار المتساوي الضغط لتحقيق كثافات عالية.

وجرى تحديد خصائص مساحيق الـ SiC النانوية الناتجة باستخدام انعراج الأشعّة السينية ومجهر النفاذ الإلكتروني. ثم أُجري مزيد من تحديد الخصائص باستخدام طريقة .B.E.T، ووُجد أن المساحة السطحية تساوي 100 م$^2$/غ. وباستخدام SiC كثافته 3.2 غ/سم$^3$، وُجد بالحساب أن مقاس حُبيبة المسحوق يساوي 9.4 نم.

أُجري التلبيد العديم الضغط في فرن غرافيت عالي درجة الحرارة، حيث عُزل عنصر التسخين الغرافيتي عن الحجرة المصنوعة من الفولاذ غير القابل للصدأ والمبرّدة بالماء. واستُخدمت وحدة ثايرستور طراز (EUROCUBE 425) للتحكُّم الدقيق بدرجة حرارة الفرن وبدورة التسخين والتبريد الزمنية. وخُلِّيت الحجرة في البداية حتى نحو 1330 باسكال باستخدام مضخّة ميكانيكية، ثم نُظِّفت بالأرغون ثلاث مرات. واستُخدم في أثناء عملية التلبيد جو من الأرغون، أو جو مرجع مع الأرغون.

إن توفُّر تقنية تكثيف سريعة سوف يكون على درجة كبيرة من

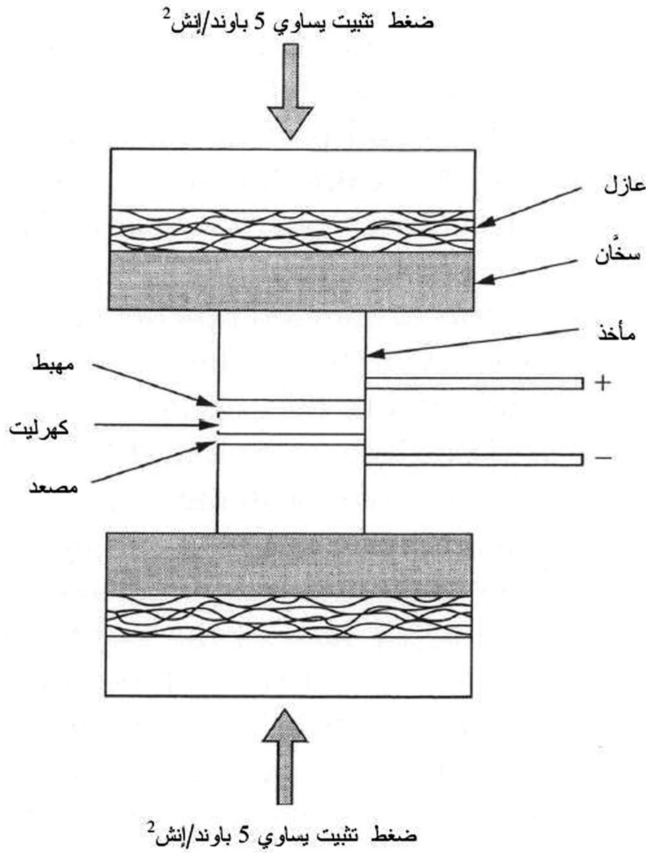
الأهمية لتطوير تقانات مستقبلية جديدة لمواد مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية. باستخدام مسحوق SiC نانوي، مقاس جُسيْماته يساوي 10 نم، جرى تلبيد عديم الضغط، لعيّنات مادة مركَّبة ذات حاضنة من الـ SiC، ومادة من الـ SiC الجَسِيم الصلب، حتى ما يزيد على 90 في المئة من الكثافة النظرية عند درجة حرارة تساوي 1450 و1500 مْ، على التتالي، خلال 240 دقيقة. أما عند درجات الحرارة المستخدمة حالياً في إجراءات تكثيف مواد الـ SiC والـ SiC/SiC المعتادة (> 2000 مْ)، فيُتوقَّع أن يكون تكثيف الـ SiC والـ SiC/SiC النانوية أسرع بأكثر من 30 مرة. إن هذا الاختراع يوفِّر مزايا أداء أيضاً، إلى جانب مزايا المعالجة. فعلى سبيل المثال، تتصف العيّنات المكثَّفة التي حُضِّرت من SiC نانوي، بمقاومة كسر أعلى كثيراً (400 في المئة) من مقاومة تلك التي تُحضَّر من الـ SiC الميكروي. وينطبق هذا الفتح التقاني أيضاً على جميع المواد المركَّبة السيراميكية الكربيدية والنيتريدية والبوريدية والسيليسيدية والأُكسيدية المهمة تجارياً.

## تطبيقات المواد النانوية البنية

بيَّنت تجارب مبكرة في برنامج بحث مستمر أنه يمكن تحسين البطاريات الحرارية، ذات الأقطاب الصلبة والمادة الكهروليتية المصنوعة من مسحوق، باستخدام مهبط مصنوع من مسحوق ذي حُبيْبات أصغر (نانوية مقابل ميكرويّة المقاس). ومن تلك التحسينات إمكان صنع واستخدام مهابط أرق، إضافة إلى زيادة في المتانة الميكانيكية والاستقرار الحراري وكثافة القدرة الكلية.

البطارية الحرارية هي بطارية غير قابلة للشحن، تُفعَّل بتسخين كهروليت صلب حتى الانصهار لإنتاج طاقة كهربائية لمدة محدودة من الزمن. والبطاريات الحرارية هي مصادر طاقة عالية الوثوقية ذات كثافات قدرة عالية وعمر تخزين طويل. وهي مفيدة على وجه

الخصوص لتأمين طاقة خلال مدة قصيرة للأسلحة المُستهلكة (الطَوربيدات والمقذوفات) ومرْكَبات الفضاء الاستكشافية. ومن التطبيقات التجارية المستقبلية المحتملة لها هي توليد طاقة طوارئ في الطائرات، وتوفير طاقة إقلاع للسيارات التي ضعُفت بطارياتها.




**الشكل 5 ـ 21: الخلية الأساسية للبطارية الحرارية تحتوي على أقراص أقطاب وكهرليت. وخلافاً للبطاريات الشائعة في كثير من المنتجات التجارية، يجب تفعيل هذه الخلية بتسخينها حتى درجة حرارة انصهار الكهرليت.**

تتكوَّن خلية البطارية الواحدة (انظر الشكل 5 ـ 21) من قرص كهروليتي موضوع بين قرصي مهبط ومصعد. وكل قرص مصنوع بالكبس البارد للمسحوق الملائم للمصعد أو المهبط أو الكهروليت. لقد كانت البطاريات الحرارية تُصنع حتى الآن بتقنيات تفرض حدوداً دنيا على سماكات الأقراص الضرورية لتحقيق متانة ميكانيكية ملائمة. لذا كانت كثافات الطاقة التي يمكن تحقيقها، وخصائص الأداء الأخرى، محدودة، وكان التقدم نحو التصغير وتحسين خصائص التفعيل والأمان معاقاً.

استُخدمت في التجربة خليطة مكوّنة من 41 في المئة ليثيوم و56 في المئة سليكون مادة للمصعد، أتت على شكل مسحوق ذي جُسيْمات ميكرويّة المقاسات. وصُنعت أقراص المصعد بكبس ذلك المسحوق في قالب فولاذي دائري قطره 2 سم، بضغط يساوي 41 ميغا باسكال. وتضمنت مادة الكهروليت مسحوقاً من ملح أصهري يتألف من 45 في المئة كلور الليثيوم و55 في المئة كلور البوتاسيوم. ولتقوية أقراص الكهروليت، خُلط مسحوق الملح الأصهري مع 35 في المئة من مسحوق أُكسيد المغنيزيوم. وكُبس المسحوق الناتج بضغط يساوي 28 ميغا باسكال لتكوين أقراص الكهروليت.

وصُنعت أقراص المهبط من خليط مكوَّن من 68 في المئة من مسحوق الـ $FeS_2$، و30 في المئة من مسحوق الملح الأصهري، و2 في المئة من الـ $SiO_2$. وكُبس الخليط بضغط يساوي 28 ميغا باسكال لتكوين أقراص المهبط. وبغية المقارنة، استُخدمت جُسيْمات $FeS_2$ مقاساتها من رتبة 1 ميكرون لصنع بعض الأقراص المهبطية، واستُخدمت جُسيْمات $FeS_2$ مقاسها الوسطي يساوي 25 نم لصنع أقراص مهبطية أخرى. وصُنع مسحوق الـ $FeS_2$ النانوي بطحن مسحوق الـ $FeS_2$ الميكروي بواسطة طاحونة الكرات.

من أجل وزنين متساويين من المسحوق المخلوط، وعند ظروف

معالجة متماثلة، كانت أقراص المهبط المصنوعة من الـ $FeS_2$ النانوي البنية أرق بـ 23 في المئة، ولذا أكثف بـ 30 في المئة من تلك المصنوعة من الـ $FeS_2$ الميكروي البنية. ووُجد أن الأقراص النانوية البنية كانت أقوى من الأخرى من حيث درجة التحطُّم في اختبار الإسقاط البسيط. وبذلك جرى عرض أنه يمكن صنع أقراص مهبطية أرق وأمتن باستخدام مسحوق الـ $FeS_2$ نانوي البنية بدلاً من ذاك الميكروي البنية.

وفي اختبار التحليل الحراري الوزني (Thermogravimetric Test) في أثناء التفكيك الحراري للـ $FeS_2$ إلى $FeS + S$، وُجد أن الأقراص النانوية كانت أكثر استقراراً.

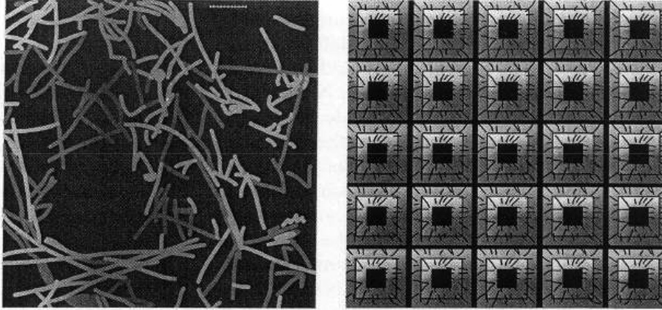
أخيراً، وُجد أن أداء البطاريات التي تحتوي على أقراص مهابط نانوية من حيث تفريغ الشحنة الكهربائية أفضل من أداء تلك التي تحتوي على أقراص مهابط ميكرويّة. إذ بلغت الطاقة الكهربائية المفرَّغة لواحدة الكتلة التي وُسِّطت على كامل مادة الخلية (القطبين والكهروليت)، 109 جول/غ في الحالة النانوية، و58 جول/غ في الحالة الميكرويّة.

من التطبيقات الأخرى للمواد النانوية البنية هناك مساحيق محسَّنة لإعاقة انتشار النيران، قيد التطوير حالياً، تقل مقاسات جُسيْماتها عن 100 نم. يمكن استخدام هذه المساحيق مكوِّنات لطلاءات معيقة للنيران، أو يمكن خلطها مع مواد بوليمرية مركَّبة لصنع أقمشة، أو مكوِّنات إنشائية معيقة لانتشار النار. استُخدم في تجارب أولية لمعيقات النيران النانوية مكوِّن رئيس هو أُكسيد الأنتيموان النانوي البنية الذي رُكِّب بالتبخير الحراري والتكثيف على سطح بارد لمسحوق أُكسيد الأنتيموان الميكروي الجُسيْمات في حجرة ضغطها يقل من الضغط الجوي.

نظراً إلى المساحات السطحية النوعية الكبيرة للجُسيْمات ذات

المقاسات الصغيرة في معيقات النيران النانوية البنية، فإن تلك المواد تتصف بقابلية تفاعل شديدة، ولذا بكفاءة عالية لإعاقة النيران. فمقاس الجُسيْم الصغير يمكِّن من خلط هذه المواد مع مواد أخرى في مستوى النعومة والتغلغل القريب من المستوى الجُزَيئي.

خلافاً للمواد الأخرى المعيقة للنيران ذات الجُسيْمات الكبيرة، يمكن تضمين المعيقات النانوية في ألياف ميكرويّة ودون ميكرويّة، وهذا يمثل مزية مهمة لصنع ملابس تبقى دائماً مقاومة للنيران، مقارنة بالألبسة التي تُجعل معيقة للنيران بواسطة الطلاءات التي تتقشر بالغسيل المتكرر. وفي فئة أخرى من التطبيقات المحتملة، يمكن تضمين معيقات النيران النانوية في التجهيزات الإلكترونية الميكرويّة التي يمكن للجُسيْمات ذات الأبعاد الكبيرة فيها أن تؤثّر في أدائها.



**الشكل 5 ـ 22: أسلاك نانوية لصنع مواد جديدة من قبيل خلايا وقود الأكسيد الصلب.**

---

## الأسلاك النانوية

صنع العلماء في جامعة هارفارد ليزرات ضئيلة يمكن وضعها ضمن رقاقات السليكون الميكرويّة. وهذه الليزرات، أو الأسلاك

النانوية، هي أسلاك مصنوعة من نصف الناقل كبريتيد الكادميوم، وقطر الواحد منها يساوي 100 نم (انظر الشكل 5 ـ 22). ويمكن لهذه التجهيزات أن تساعد على جعل الاتصالات والتقانة الطبية أسرع وأشد تراصاً، وحتى أن تؤدّي إلى تطبيقات جديدة.

صحيحٌ أن أولى ليزرات الأسلاك النانوية قد صُنعت من أُكسيد الزنك في عام 2001، وكانت تُصدر ضوءاً في المجال فوق البنفسجي، إلا أنها كانت تحتاج في تشغيلها إلى حقنها بالضوء من ليزر آخر. لكن معظم التطبيقات تحتاج إلى ليزرات يمكن تشغيلها وإيقافها إلكترونياً.

وقد حقَّق فريق جامعة هارفارد هذا التحكُّم الإلكتروني بوضع سلك نانوي من كبريتيد الكادميوم على سطح سليكوني مع تماس كهربائي فوقه. وعند قيمة معيّنة للجهد الكهربائي، يمر تيار من السليكون إلى السلك النانوي الذي يُصدر ضوءاً أزرق مخضرّاً من نهايتيه. يعتمد لون الضوء الصادر على نوع نصف الناقل الذي صُنع منه السلك النانوي. على سبيل المثال، يُصدر نيتريد الغاليوم ضوءاً في المجال الطيفي من الأزرق حتى فوق البنفسجي[(107)].

## الأحزمة النانوية

ليست المُحِسَّات البالغة الصغر والشاشات المسطَّحة الرخيصة سوى تطبيقين من عدد كبير من التطبيقات المحتملة للأحزمة النانوية، وفق قول الباحثين في معهد جورجيا للتقانة[(108)] في أطلنطا. الأحزمة النانوية هي أكاسيد معدنية نصف ناقلة شفافة مسطحة رقيقة نانوية المقاس، أما معادنها فهي الزنك والقصدير والإنديوم والكادميوم والغاليوم ومواد أخرى من الدرجة التجارية.

تُصنع الأحزمة النانوية في المخبر (من مساحيق تلك الأكاسيد) في أنبوب $Al_2O_3$ منظف بالـ $N_2$ أو Ar ومسخَّن حتى درجة حرارة بين 1100 و1400 مْ. وتتكوَّن الأحزمة النانوية التي يقع عرض الواحد منها بين 30 و200 نم، وتقع سماكته بين 10 و15 نم، ويساوي طوله ميليمترات عدة، حينما يتبخّر المسحوق ويتجمَّد على لوح $Al_2O_3$ في جزء بارد من الفرن. وإذا أُبقي المسحوق المتجمد ضمن ضغط وحرارة مناسبين مدة كافية، تكوَّنت أحزمة بلّورية.

تتصف الأحزمة النانوية بمزايا جيدة مقارنة بالأسلاك وأنابيب الكربون النانوية المعروفة، وفق قول مجموعة معهد جورجيا. فالأحزمة نقية كيميائياً، ولا تحتاج إلى حماية من الأكسدة مثل الأسلاك النانوية. ويمكن حَنْيِها بزاوية $180^o$ من دون أن تنكسر. وهي متجانسة بنيوياً وخالية من العيوب تقريباً، ويتألف كل منها من بلّورة واحدة ذات عدد محدّد من الأوجه. إن هذا مهم جداً لأن العيوب يمكن أن تدمّر خواص النقل الكمومية. يُضاف إلى ذلك أن بنيتها المتناسقة تساعد أيضاً على الإنتاج الكمي للتجهيزات الإلكترونية والإلكتروبصرية النانوية التي تحتوي عليها.

## الأغشية النانوية

يقوم الباحثون في جامعة أريزونا بتوكسون بتطوير أغشية عضوية جديدة يمكن أن تجعل المصابيح القماشية والملابس العسكرية المحوْسبة ممكنة. يمكن إنتاج الأغشية العضوية التي تُطبع على الورق والبلاستيك والمنسوجات، بكميات كبيرة على ركائز مرنة.

يسعى الباحثون إلى طباعة هذه الأغشية ذات السماكة النانومترية باستخدام الأدوات المتوافرة في الطباعة بالشاشة (Screen Printing)،

والطباعة بنفث الحبر (Ink-jet Printing)، والطباعة الليزرية (Laser Printing)، والطباعة الغائرة (Gravure Printing) التي جميعها يخفِّض التكلفة. وقد برهن أولئك الباحثون في الآونة الأخيرة أنه يمكن طباعة هذه الأغشية النانوية على القماش.

وفق قول غسان جبور (Ghassan Jabbour)، الباحث والأستاذ المشارك لعلوم البصريات في جامعة أريزونا: «نحن نعرف الآن كيفية مكاملة المواد العضوية مع القماش. لم نحل المشكلة كلها حتى الآن، لكننا نفهم المأزق، أي ما يمنع تلك المواد من الالتصاق بالقماش». فالمشكلة الرئيسة هي أن القماش يحتفظ بالرطوبة، والمواد العضوية حسّاسة لها[109].

## الدارات النانوية

يمكن للتجهيزات الإلكترونية النانوية التي تجمِّع نفسها ذاتياً أن تكون على مقربة من التحوِّل إلى واقع عملي بفضل تقنية طوَّرها علماء في مركز بحوث وعلوم وهندسة المواد في جامعة ويسكنسن[72].

تحفر الطباعة الضوئية اليوم عناصر الدارة على شُراحات سليكونية، وهذه طريقة جيدة لصنع أشكال ذات مقاسات تساوي نحو 150 نم، وهي مقاسات شائعة في جيل الرقاقات الحالي المشابه للمعالج Pentium 4. إلا أنّ تكلفة معمل لصنع الرقاقات تتزايد أسّياً مع تقلص مقاسات الأشكال. وليس واضحاً إن كان المصنِّعون يستطيعون توسيع التقانة الحالية إلى ما يقل عن 50 نم، وفق رأي الخبراء.

إلا أن بعض التقنيات التجريبية تبني أشكالاً أصغر. على سبيل المثال، تحفر حزمة إلكترونية مبأَّرة جيداً عناصر دارة نانوية المقاس على سطح السليكون، خطّاً تلو خط. لكن هذه السيرورة تستغرق

نحو أسبوع لحفر رقاقة واحدة، وهذا غير عملي مقارنة بالطباعة الضوئية التي تحفر مئات الرقاقات في الساعة الواحدة.

ويُستخدم في تقنية أخرى تسترعي الانتباه ما يسمّى بالبوليمرات التعاقبية (Block Polymers) التي تجمِّع نفسها تلقائياً في بُنى دورية في السلّم الجُزَيئي. إن البوليمرات التعاقبية هي مركَّبات مكوَّنة من سلسلتي بوليمر طويلتين أو أكثر موصولة معاً عند نهاياتها. إلا أن هذه المواد تنزع نحو ترتيب نفسها في بقع أو أسطوانات أو أنماط عريضة دوَّامية الشكل، جميعها بعيد عن البُنى الدقيقة الانتظام اللازمة للدارات.

قام فريق ويسكنسن بضم هاتين الطريقتين التجريبيتين معاً في ما أسماه التجميع الذاتي «المقولب» أو «الموجَّه». فباستخدام ضوء فوق بنفسجي بعيد في الطيف (طول موجته أقصر جداً من طول موجة الضوء المستخدم في الطباعة الضوئية العادية)، مع شيء من البراعة في استخدام البصريات، وضَّع الفريق نمطاً متناوباً من الشرائط المستقيمة المتوازية النشطة كيميائياً التي يساوي عرض الواحدة منها 20 ـ 30 نم. وبعدئذٍ، غُسل سطح السليكون الذي وُضِّعت عليه الأشكال بمحلول يحتوي على بوليمر مشترَك تعاقبي. في هذه الحالة، يحتوي المركَّب (أي البوليمر التعاقبي) على بوليمرين: أحدهما ينجذب إلى أحد نوعي الشرائط المتناوبة، وينجذب الآخر إلى النوع المقابل. ويمكِّن تغيير عوامل من قبيل التباعد بين الشرائط وطول البوليمر، البوليمر المشترك من ترتيب نفسه فوق الشرائط النانوية.

يُقرُّ باحثو فريق ويسكنسن أن الطريق طويلة أمام الانتقال من خطوط متوازية من اللّدائن إلى تجهيزات إلكترونية عاملة. إلا أن إحدى الخطوات التالية الواضحة هي تنمية البوليمر المشترك التعاقبي على شكل أعمدة نانوية منتصبة. حينئذٍ يمكن لكل عمود من هذه

الأعمدة أن يحمل بتّا واحدة من المعلومات. ويقول الباحثون إن هذه التقنية يمكن في النهاية أن تُبنى وسط خزن مغنطيسي فائق السعة، وأن تجعل الحواسيب ذات الذاكرة التي سعتها تساوي 4 تِرًا بايت ممكنة. لكن ثمة تطبيق محتمل آخر هو الدارات المتكاملة التي تستخدم أنماط البوليمر المشترك أدلة لحفر الركيزة السلكونية.

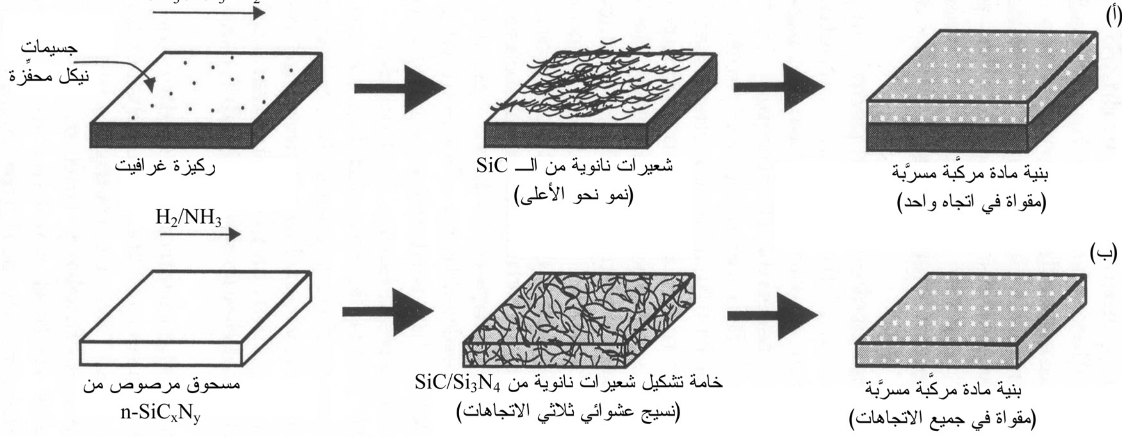
## الشُعيْرات النانوية

بناءً على عمل كير (Kear) وسْترَتّ[73] (Strutt) لتصنيع مواد مركَّبة نانوية البنية ذات حاضنة سيراميكية مقوّاة بشُعيْرات مصنوعة كلياً من مواد أولية معدنية عضوية، أدت البحوث الأخيرة إلى خيارين (انظر الشكل 5 ـ 23). باستخدام ثلاثي كلور ميثيل السيلان (Trichloro-methylsilane) بوصفه المركَّب الأولي، مع محفِّز نانوي Ni على قاعدة غرافيتية، جرت تنمية شعيرات SiC بمعدل عملي يساوي ميليمترات عدة في الساعة عند درجة حرارة 1400 ـ 1100مْ[73]. يحصل نمُو الشُعَيرات بما يسمّى آلية بخار ـ سائل ـ صلب (Vapor-Liquid-Solid) (VLS)، حيث يتفاعل مركَّب السليكون الغازي مع جُسيْمات النيكل النانوية لتكوين أصهري سائل من النيكل والسليكون. بعدئذٍ يحصل نمو الشُعَيرات بنقل السليكون عبر قطيرات السائل إلى الشُعَيرات التي تنمو عند قاعدتها. ونظراً إلى أن هذا في المحصلة هو عملية تنمية من صُهارة، فإن شعيرات الـ SiC تتصف بدرجة عالية من الكمال البلوري إضافة إلى مقاومة شدّ عالية جداً. واكتشف كير وسْترَتّ[73] أخيراً أيضاً أن مساحيق الـ $n\text{-}SiC_xN_y$ المحضَّرة بتكثيف الأبخرة كيميائياً (Chemical Vapor Condensation) (CVC)، والتي جرى تحضيرها بالتفكيك الحراري لسداسي الميثيل ثنائي السيلازان (Hexamethyl-Disilazane)، يمكن أن تُحوَّل أيضاً

إلى شعيرات بمعالجة حرارية بسيطة ضمن تيار غاز تفاعلي[110]. لذا فإن تسخين المسحوق النظامي في تيار من الـ $H_2$ عند 1200 مْ يعطي شعيرات SiC، في حين أن التسخين ضمن تيار من $NH_3/H_2$ يعطي شعيرات $Si_3N_4$. ويحصل نمو سريع للشعيرات بآليتين مختلفتين: آلية تنمية مسحوق ـ سائل ـ صلب (Powder-Liquid-Solid) (PLS) الجديدة، وآلية بخار ـ سائل ـ صلب المشهورة. إن إحدى السمات اللافتة في التحويل الحراري الكيميائي للمساحيق النظامية إلى شعيرات هي تكوُّن نسيج عشوائي ثلاثي الأبعاد يشابه شكل فرشة المسحوق (Powder Bed) الأصلي الذي اشتُق منه. وفي الواقع، يمكن إزالة خامة الشُعَيرات الأولية، القوية والمرنة، سليمة من وعائها، أي البوتقة السيراميكية، واستخدامها في معالجات لاحقة. وقد حاول كير وسْتْرَت تشريب خامة الشُعَيرات الأولية بِطين نانوي الجُسيْمات بغية استقصاء إمكان صنع صفيحة مادة مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية (انظر الشكل 5 ـ 23).

وأعلن باحثون في جامعة واشنطن في سانت لويس أنهم صنعوا شعيرات نانوية من البورون باستخدام ترسيب الأبخرة كيميائياً، حيث كانت أقطار الجُسيْمات في المجال 200 ـ 20 نم، وكانت الشُعَيرات (وتسمّى أيضاً أسلاكاً نانوية) نصف ناقلة ولها خواص البورون.

في العالم النانوي، أنبوب الكربون هو المهيمن، وهو أوفر جُسيْم حظاً في استخدامه لصنع مواد جديدة، إضافة إلى تزايد أهميته بوصفه ناقلاً جيداً محتملاً في عالم استكشاف الإلكترونيات الجُزَيئية المتبرعم. إلا أن ثمة محدوديات للكربون: فبنية خليته الجدارية وناقليته المتغيّرة تجعلانه ناقلاً غير موثوق. فثلث الأنابيب التي جرت تنميتها تمتلك خصائص نقل كهربائي جيدة، أما البقية فهي أنصاف نواقل. ولا يمكن تنمية نوع محدّد ذي خواص مفترضة سلفاً، وما يحصل هو أن مزيجاً من الأنواع ينمو معاً.




**الشكل 5 ـ 23: مخططات توضيحية تُظهر نهجين مختلفين لتحضير مواد مركّبة ذات حاضنة سيراميكية مقوّاة بالشعيرات: (أ) تقوية وحيدة الاتجاه، (ب) تقوية في جميع الاتجاهات.**

لذا التفت الباحثون في جامعة واشنطن[111] إلى البورون، المجاور للكربون في الجدول الدوري، لرؤية إن كان بديلاً جيداً. إذا أمكن صنع أنابيب نانوية من البورون، وأمكن إنتاجها بكميات كبيرة، فإنها ستنفرد بمزية امتلاكها لخواص متناسقة برغم الاختلافات في مقاسات أقطارها وبنية جدرانها. واكتشاف أن الشُعَيرات النانوية هي نصف ناقلة يجعلها مرشحاً جيداً للأسلاك الإلكترونية النانوية.

«تتوقّع المقالات النظرية بأنه يمكن تحقيق أنابيب البورون النانوية، وأنه إذا كان ذلك ممكناً، فإنها يجب أن تتصف بخواص كهربائية متناسقة بقطع النظر عن أشكالها الحلزونية. وهذه مزية مهمة مقارنةً بالكربون»، هذا ما ادّعته كارولين جونز أوتّن (Carolyn Jones Otten) مع بورو (Buhro) في جامعة واشنطن. «لذا قررنا صنعها. وقد قمنا فعلاً ببعض الأعمال الخاصة بأنابيب الـ BN النانوية، المشابهة في بنيتها لأنابيب الكربون النانوية، لكنها عازلة كهربائياً. واستخدمنا طريقة مشابهة في محاولة صنع أنابيب بورون نانوية. وقمنا بتنمية أشياء تبدو واعدة: بُنى طويلة رفيعة تشابه الأسلاك. في البداية ظننا أنها جوفاء، لكن بعد المعاينة الدقيقة، وجدنا أنها شعيرات كثيفة، لا أنابيب جوفاء نانوية».

إن العبارة **أنابيب البورون النانوية** أشدّ إثارة في مجال التقانة النانوية من العبارة **الشُعَيرات النانوية**، بسبب بنيتها الفريدة التي يمكن أن تُشبَّه بصيغة مميزة لعنصر. فالكربون مثلاً موجود على شكل غرافيت وألماس، و«كرات بَكّي» وأنابيب نانوية. كذلك تتوقّع الدراسة النظرية أن أنابيب البورون النانوية يجب أن تتصف بناقلية كهربائية عالية جداً، يتوق الباحثون إلى قياسها.

أُخضعت الشُعَيرات التي صنعها فريق بورو إلى قياسات كهربائية توصيفية لرؤية إن كانت نواقل جيدة، برغم كونها شعيرات، لا أنابيب. فوُجد أنها تُبدي سلوك أنصاف النواقل. إلا أن البورون

الكتلي يمكن أن يُشاب بذرّات أخرى لزيادة ناقليته. وقد حاولت مجموعة بورو والمتعاونون معها مراراً فعل الشيء نفسه مع شعيرات البورون النانوية لزيادة ناقليتها، وذلك على غرار إشابة أنابيب الكربون النانوية وغيرها من أنواع الأسلاك النانوية المتنوعة الأخرى، التي جُمِّعت في تراكيب ناقلة ونصف ناقلة لصنع مكوّنات عدة إلكترونية ميكرويّة مختلفة من قبيل المقوِّمات وترانزستورات المفعول الحقلي والثنائيات.

يقوم بورو ومجموعته، منذ بدايات تسعينيات القرن العشرين، بصنع أنواع كثيرة من الأسلاك والأنابيب النانوية التي يمكن في النهاية تضمينها في تجهيزات إلكترونية نانوية. وقد استحوذت الأسلاك والأنابيب النانوية على مزيد من الاهتمام لاستخدامها ترانزستورات وأسلاكاً ومفاتيح لدارات وتجهيزات فائقة الصغر تبنى في المستوى الجُزَيئي تقريباً.

يقول بورو: «إذا أردت جعل الإلكترونيات أصغر، عليك أن تجعل مكوِّناتها أصغر والأسلاك التي تصل بينها أقصر. إننا نحاول بناء البنية التحتية العلمية للتقانة النانوية الإلكترونية وفهم المبادئ الأساسية لعملها. علينا إيجاد كيفية عمل هذه الأسلاك النانوية وكيفية توصيلها في دارات وتجهيزات عاملة. حتى عندما نحقِّق ذلك، لا أحد يعرف كيف سوف تُصنع رقاقة حاسوبية تستخدم تلك الأشياء. إنها مسألة غير محلولة ما زالت مفتوحة على مصراعيها. أما العلم الجوهري الذي يجب بناؤه، فهو مهم ويجب بناؤه».

## المحافظ النانوية

اكتشف كوسونوكي (Kusunoki) وزملاؤه[112]، لدى مركز السيراميكات الدقيقة في اليابان، أنه يمكن إنتاج محافظ الكربون

النانوية بمجرد تسخين ألياف الكربون، من دون حاجة إلى الانفراغ القوسي الكهربائي. وقد أجرى فريق البحث استقصاءات ميكرويّة لجُسيْمات الكربون النانوية اللامتبلورة عند درجات حرارة عالية، وتحقَّق أن الجُسيْمات تصبح غرافيتية عند سطوحها.

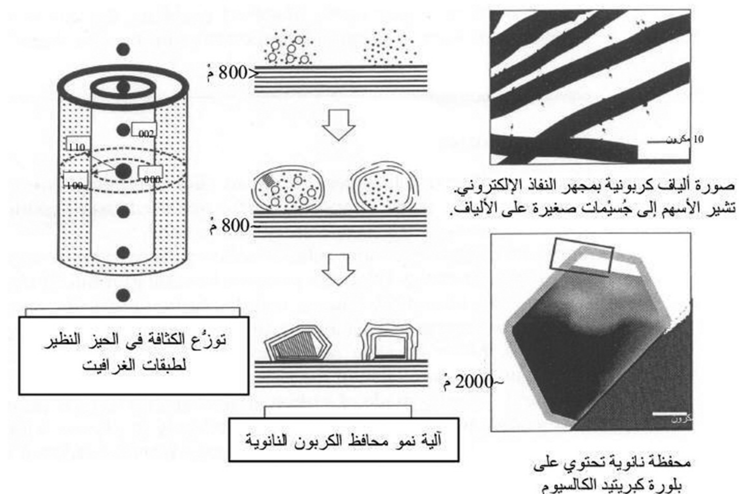
ومنذ عام 1990، حينما اكتُشف الـ C60 في الفحم، أي جُزَيء الكربون الشبيه بكرة القدم، عاين كثير من الباحثين أقفاص ذرّات الكربون، أو الفُلِّرينات، وجرى استقصاء كثير من التطبيقات الممكنة لها في المجالات المختلفة. إن أكثر جوانب الجُزَيئات الفُلِّرينية إغراء هي الأنابيب والمحافظ النانوية المكوَّنة من ذرّات الكربون، وذلك بسبب خواصها.

كان يُظن سابقاً أنه لا يمكن صنع الفُلِّرينات إلا ضمن بلازما مع حقل كهربائي شديد ودرجة حرارة عالية جداً، ولذا يستخدم معظم السيرورات المعروفة انفراغ القوس الكهربائية. إلا أن البحث الجديد يُظهر أن الأنابيب والمحافظ الكربونية النانوية يمكن أن تُنتج بسيرورة حرارية محضة.

أدرك فريق البحث أنه يمكن تكوين محافظ الكربون النانوية من تلبيد ألياف الكربون. وأكثر تحديداً، شوهدت محافظ الكربون النانوية على سطوح الألياف بعد تسخينها حتى 2000 مْ مع الشدّ. وبرغم أن بعض المحافظ كانت جوفاء، فإن معظمها تألف من قوقعة مكوَّنة من ست صفائح غرافيتية، وتحتوي على بلّورة أحادية من كبريتيد الكالسيوم CaS، التي يبدو أنها تأتي من عدم نقاوة الكربون الأصلي (انظر الشكل 5 ـ 24).

وكشفت استقصاءات فريق العمل تلك عن أن جُسيْمات كربون لامتبلورة تنمو على سطوح ألياف الكربون التي تُسخَّن، ثم تصبح غرافيتية عند السطح ومجوّفة عند 800 مْ. ويتحوّل كل جُسيْم إلى

محفظة نانوية، مكعبة أو متعدّدة الأوجه، عندما ترتفع درجة الحرارة حتى 2000 مْ.




**الشكل 5 ـ 24: تنمية محافظ نانوية كربونية.**

ومن السهل أيضاً الحصول على المحافظ بهز ألياف الكربون بواسطة الأمواج فوق الصوتية التي تعطي محافظ على شكل مسحوق. ونظراً إلى توفّر كثير من المحافظ الكربونية النانوية، فإن من السهل تحديد خواصها الفيزيائية. ومن تلك الخواص إمكان استخدامها، بكمياتها الكبيرة، مزلقات مرنة.

يمكن لهذه الطريقة الجديدة أن تكون مصدراً للكربون الشديد النقاوة. فحين إضافة مادة إشابة إلى الكربون المصدري، تنتج هذه الطريقة محافظ تغلّف تلك المادة. ومن التطبيقات المحتملة لمثل هذه المحافظ نظام تزويد بالدواء، ونظام تزويد بوسط تباين للتصوير الطبي.

## الكرات النانوية

يدرس مهندسو مختبرات سانديا الوطنية الأميركية كرات نانوية من السليكا المديدة العمر التي تقع مقاساتها في المجال 2 ـ 50 نم بغرض إيجاد تطبيقات صناعية وطبية لها. تتكوَّن الكرات حينما يأخذ الباحثون قطيرات من محلول مائي متجانس من الماء والإيثانول والسليكا وخافض توتر سطحي، ويمرّرونها عبر مفاعل أو فرن. يقول جِفْ برينكر (Jeff Brinker)، الباحث لدى مختبرات سانديا: «عندما يبدأ السائل بالتبخر، تتجمع بقية المادة ذاتياً في جُسيْم تام الانتظام يحتفظ بشكله حين تسخينه». تمتلك هذه الجُسيْمات مسامات متجانسة تستطيع امتصاص مواد عضوية وغير عضوية، ومنها الحديد. هذا يعني أنه يمكن توضيعها مغنطيسياً وتحرير محتوياتها وفق الحاجة، وهذا ما يجعلها ملائمة تماماً للاستخدام في نظم التزويد بالدواء.

ويعتقد مهندسون آخرون أنه يمكن استخدامها حشوات في علب الأسلحة وغيرها من الأدوات. تختلف عوامل التمدّد الحراري للبوليمرات المستخدمة في التعليب عادةً عن عوامل تمدُّد التجهيزات المعدنية التي تحتضنها اختلافاً كبيراً. لذا، حينما تتغيّر درجة الحرارة، تتمدّد العلب أو تتقلّص، ضاغطةً على التجهيزات التي يُفترض أنها تعمل على حمايتها. أما الكرات النانوية، من ناحية أخرى، فهي مسامية وتؤدّي إلى ضغط أقل كثيراً حين تمدّدها أو تقلصها[113].

## الألياف النانوية

ثمة تقارير مفادها أن العلماء[114] في جامعة نورث وسترن في إيفانستون في إلِّنوي، قاموا بتصميم مادة شبه عظمية، يمكن أن تكون

ملائمة لإصلاح كسور العظام ومعالجة سرطان العظام. ويُقال إن جُزَيئات تلك المادة تتجمَّع ذاتياً في بنية ثلاثية الأبعاد، تحاكي السمات الأساسية لعظم الإنسان في المستوى النانوي، ومنها ألياف الكولاجين (Collagen) النانوية التي تعزِّز التمعدن وتكوُّن البلّورات المعدنية النانوية. يوجد الكولاجين الذي يُعتبر أوفر بروتين في جسم الإنسان، في معظم نُسُج الجسم، ومنها نُسُج القلب والعينين والأوعية الدموية والجلد والغضاريف والعظام، وهو يعطي تلك الأعضاء متانتها البنيوية.

عندما تتكوَّن هذه الألياف النانوية التركيبية، تصنع هلاماً يمكن أن يُستخدم كنوع من اللاصق لكسور العظام، أو في تكوين منصة للنسج الأخرى كي تتكاثر. وحين إضافة مادة العظم المعدنية هيدروكسي أباتيت (Hydroxyapatite)، توجِّه الألياف نمو البلّورات المعدنية لتصطف حول ألياف الكولاجين في العظم الطبيعي على نحو مشابه جداً لذاك الذي للهيدروكسي أباتيت. وبسبب البنية الكيميائية، يحرِّض هلام الألياف النانوية التحام خلايا العظم الطبيعية، وهذا ما يساعد على ترميم الكسر. ويمكن استخدام الهلام أيضاً في تحسين عملية تبديل الورك والمفاصل الأخرى.

وتشير النتائج أيضاً إلى كيفية صنع مواد أخرى بالتجميع الذاتي والتمعدن التلقائي، وذلك بالاستفادة من مادة غير عضوية تنمو على مادة عضوية. يمكن استخدام تلك المواد في الإلكترونيات والضوئيات والمغانط، وفي تسريع التفاعلات الكيميائية.

## السيراميكات النانوية والقواقع

لماذا ينكسر فنجان القهوة السيراميكي بسهولة أكثر من قوقعة بحرية؟ قد يبدو هذا سؤالاً جيداً للتأمل فيه في أثناء الاسترخاء على الشاطئ.

تبيَّن أن القواقع البحرية تمتلك بعض المزايا المدهشة التي كانت موضع اهتمام الباحثين طوال مدة تزيد على عشر سنوات. «إنها استثنائية»، يقول آرثر هوير (Arthur Heuer)، أستاذ علم المواد في جامعة Case Western Reserve University، الذي يعزو مقاومتها للتصدّع والتحطم إلى «بنيتها الميكرويّة المتقنة». ويضيف أن فهم تفاصيل هذه البنية النانوية يمكن أن يقود إلى أفكار عن كيفية صنع سيراميكات ذات متانة ومقاومة للكسر مشابهتين[115].

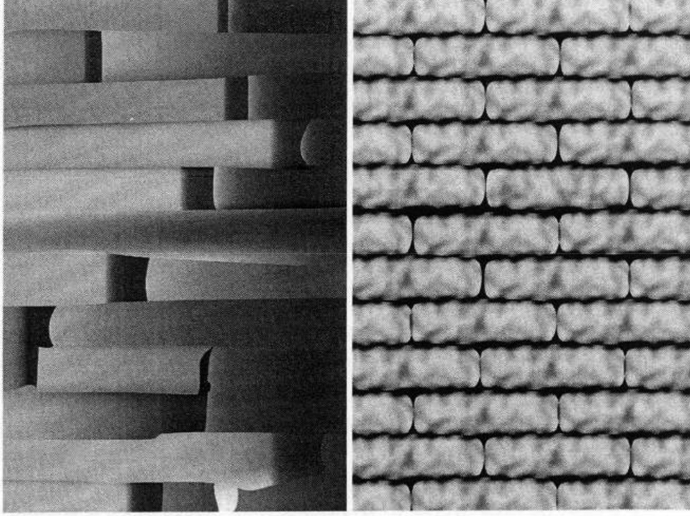
تتألف قوقعة حيوان أذن البحر، في المقام الأول، من كربونات الكالسيوم المرتبة في أطباق متعدّدة الجوانب المتراصّة، بإحكام في طبقات. ويلصق بوليمر مطّاطي الأطباق معاً، ويعمل كوسادة بين الطبقات. والقوقعة لا تنكسر أو تتهشم بسهولة لأنه عندما يتكوَّن صدع ميكروي، فإنه ينتشر على طول مسارات معقّدة متعرّجة تجعله في المحصلة يتخامد. وتمتص طبقات البوليمر التصدُّع أيضاً، بحيث أنه برغم حصول ما يكافئ النتوءات والخدوش، فإن القوقعة لا تنكسر بسهولة.

بدأ موهان مانوهاران (Mohan Manoharan) وفريقه لدى شركة General Electric العمل بالقواقع البحرية في شهر كانون الثاني/يناير عام 2002. وبعد استكمال دراستهم للبنية الميكرويّة للقواقع، بدأوا بمحاولة تقليد الطبيعة. وبنى الفريق نماذج حاسوبية لمواد مستوحاة من القوقعة، مبتدئاً بنماذج تتألف من بضع طبقات فقط (انظر الشكل 5 ـ 25).

## الهوائيات النانوية

عرض الباحثون في جامعة برديو (بالمحاكاة الرياضية) هوائيات نانوية، وهي أسلاك ضئيلة وكرات معدنية مرتبة بأشكال

مختلفة. يمكن لهذه الظاهرة أن تؤدّي إلى نظم تصوير وكواشف طبية لعوامل الحرب الكيميائية والحيوية، قادرة على تحليل الجُزَيئات المنفردة، أو أشدّ حساسية بمليون مرة من تقانة التصوير والكشف الحالية.



**الشكل 5 ـ 25: يدرس الباحثون لدى الشركة General Electric سبب مقاومة قواقع البحر التصدع والانكسار. تُظهر الصورة اليسرى طبقات الصفيحات في البنية الميكروية لقوقعة اللؤلؤة التي وُجدت في حيوان أذن البحر ذي اللون الأحمر. وتُظهر الصورة اليمنى آخر نسخة من سيراميك صنعي استلهمه باحثو الشركة من قواقع البحر.**

تعمل الهوائيات النانوية على تحريك سُحُب من الإلكترونات في مجموعات أو بلازمونات (Plasmons). وهذا الحدث، يجعل المواد النانوية البلازمونية تتبأَّر على نحو أصغر من أطوال الموجات التي تضيئها، وهذا شيء لا تستطيع البصريات المعتادة فعله.

وخلافاً للمواد اليمينية (Right-Handed) التي من قبيل الزجاج

والبلاستيك والهواء والماء، فإن الهوائيات النانوية تُعدُّ يسارية (Left-Handed) وتعكس السلوك الطبيعي للضوء المرئي والتردّدات الأخرى التي تضيئها أو تعبر خلالها. والهوائيات النانوية، المرتبة في أزواج متوازية من الأسلاك الضئيلة، تولِّد، نظرياً، قرينة انكسار سالبة، على سبيل المثال.

يقول فلاديمير شاليف (Vladimir Shalaev)، الأستاذ في كلية الهندسة الكهربائية والحاسوب في جامعة برديو: «جرى التوقّع بهذه الظاهرة أول مرة في أواخر ستينيات القرن العشرين، إلا أن كل العمل الذي حصل حتى الآن كان على الأمواج الميكرويّة». إلا أن دفع منحني الطيف ليتضمّن الضوء المرئي يمكن أن يجعل فئة كاملة من التجهيزات ممكنة، ومنها ما يسمّى بالعدسات الفائقة للتشخيص الطبي المتقدم. الخطوة التالية: بناء هوائيات واختبارها لدعم الحسابات النظرية[116].

## الإلكترونيات النانوية

يمكن للدارات المتكاملة العالية الكثافة التي تتألف من مكوّنات مقاساتها أصغر من 10 نم أن تحقِّق فوائد جمة لجميع تقانات المعلومات، ومنها الحوسبة والتشبيك ومعالجة الإشارة. إلا أن النتائج الأخيرة تشير إلى أنه من غير الممكن توسيع صناعة الدارات العالية التكامل الحالية القائمة على تقانة السيموس (CMOS) إلى ذلك المجال من المقاسات. والسبب الرئيس هو أنه عند طول بوابة يقل عن 10 نم، تزداد حساسية موسّطات ترانزستور المفعول الحقلي السليكوني، خصوصاً عتبة جهد البوابة، للاختلافات العشوائية في حجم البوابة التي لا مفرَّ منها، ازدياداً أسّياً. وهذه الحساسية يمكن

أن ترفع تكاليف الإنتاج إلى مستويات عالية جداً، وأن تؤدّي إلى نهاية قانون مور في وقت ما من العقد القادم.

إن المفهوم الرئيس للتجهيزة النانوية البديلة، أي التجهيزة الإلكترونية القائمة على التحكُّم بحركة الإلكترونات إفرادياً في بُنى ذات حالة صلبة، يوفّر بعض المزايا المحتملة مقارنة بتقانة السيموس، ومن تلك المزايا كثرة المواد المتاحة. إلا أن الأبعاد الحرجة لترانزستورات الإلكترون الواحد للعمل عند درجة حرارة الغرفة يجب أن تكون أصغر من 1 نم، وهذا أصغر كثيراً مما تسمح به تقنيات الطباعة الحالية، وحتى القادمة، القائمة على الأشعّة فوق البنفسجية البعيدة، وعلى الحزمة الإلكترونية.

**الدارات الهجينة**

يعتقد كثير من الفيزيائيين والمهندسين أن هذه الأزمة القاهرة لا يمكن أن تُحل إلا بتغيير جذري للمفاهيم من تقانة سيموس صرفة إلى دارات نصف ناقلة ـ جُزَيئية هجينة سُمِّيت سيمول (CMOL)، وهي كلمة منحوتة من CMOS وMolecular. يمكن لهذه الدارة أن تضم:

- مستوى من تجهيزات السيموس المتقدمة المصنَّعة بالتشكيل بالطباعة الضوئية.
- بضع طبقات من صفيفات الأسلاك النانوية المتوازية المشكَّلة، على سبيل المثال، بالسكّ النانوي (Nanoimprinting).
- مستوى من التجهيزات الجُزَيئية التي تتجمَّع ذاتياً على سلك نانوي من محلول.

يجمع مفهوم السيمول مزايا المكوِّنات النانوية، ومنها وثوقية دارات السيموس والمعالم الضئيلة للتجهيزات الجُزَيئية، ومزايا تقنيات

تكوين الأشكال التي تتضمّن مرونة الطباعة الضوئية المعتادة والتكلفة المنخفضة للسك النانوي والتجميع الذاتي الموجَّه كيميائياً. ويمكن لهذه التشكيلة أن تؤدّي إلى دارات سيمول ذات كثافة غير مسبوقة، تصل إلى $3 \times 10^{12}$ وظيفة/سم$^2$، عند تكلفة تصنيع مقبولة.

وفي ما يخص المكوِّنات الوحيدة الجُزَيء، فإن التجهيزات الوحيدة الإلكترون هي الأوفر حظاً، لأن آلية عملها لا تتطلب ناقلية عالية بين التجهيزات وأقطاب الملتقيات، وذلك خلافاً لترانزستورات المفعول الحقلي. وتسمح طبقات السيموس لدارت السيمول بتجاوز مثلبة جلية في الترانزستور الوحيد الإلكترون: الربح المنخفض للجهد الكهربائي. إن العرض الأخير للترانزستورات الوحيدة الجُزَيء والوحيدة الإلكترون، الذي أجراه فريق لدى جامعة كورنِلْ برئاسة باول ماك أوين (Paul McEuen) ودانيال رالف (Daniel Ralph)، وفريق لدى مختبرات بِلْ برئاسة نيكولاي زهيتنيف (Nikolai Zhitenev)، يُعطي أملاً بأن أولى دارات السيمول سوف تظهر خلال السنوات العشر التالية. ونأمل أن تصل دارات السيمول إلى الصناعة في الوقت المناسب لاحتواء أزمة قانون مور الخانقة.

لكن قبل ذلك يجب حل مجموعة من المشاكل الفيزيائية والكيميائية والحاسوبية والهندسية الكهربائية. وعلى وجه الخصوص، على الباحثين نقل التجميع الذاتي الموجَّه كيميائياً من المستوى الحالي لتنمية طبقة واحدة على ركيزة ناعمة، إلى التوضيع الموثوق للجُزَيئات الثلاثية الأطراف على بُنى سلكية نانوية (يمكن للتجهيزات الثنائية الأطراف أن تكون ملائمة للذواكر البسيطة، لكن ليس للدارات المعقّدة).

إن مقترح تطوير وتنفيذ جُزَيئات عدّة ملائمة للترتيب المذكور آنفاً، الذي قدَّمه أندرياس ماير (Andreas Mayr)، أستاذ الكيمياء في

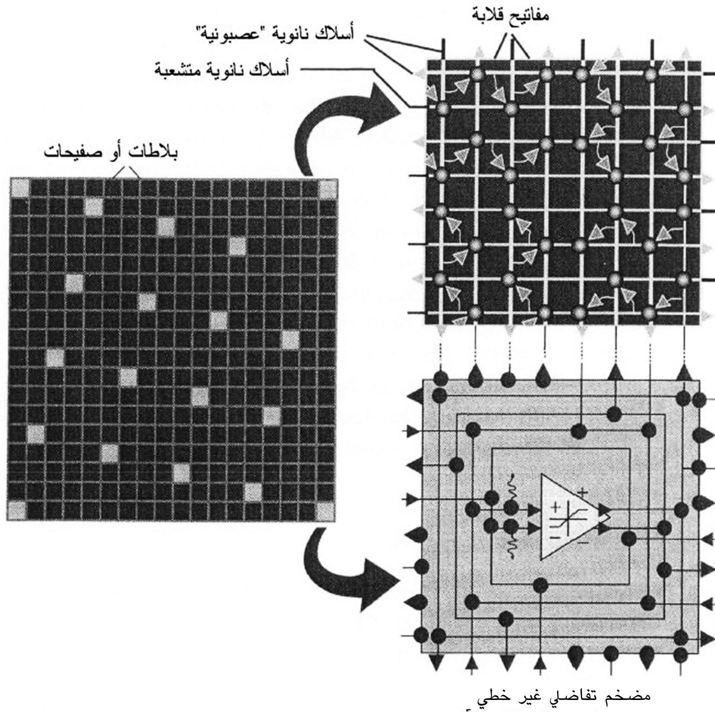
جامعة نيويورك الحكومية في ستوني بروك، يجمع من حيث المبدأ تجهيزتين وحيدتي الإلكترون معروفتين جيداً، هما الترانزستور والشَرَك (Trap). تعمل زمر ثنائي الإيميد المانحة (Diimide Acceptor) بوصفها جزراً وحيدة الإلكترون، وهي مواضع يمكن لإلكترون إضافي أن يتموضع فيها. وتلك الجزر موصولة معاً إما بجسور من متعدّد ـ فينيلين ـ إيثينيلين (Oligo-Phenylene-Ethynylene) تؤدّي دور وصلات نفقية (Tunnel Junction)، أو بسلاسل أطول لا تنقل إلكترونات، بل تجعل الترتيبة الهندسية مستقرة. وتنتهي جميع الجسور والسلاسل بزمرة التيول (Thiol Group) التي تعمل كالملاقط التمساحية الشكل، وتسمح بالتجميع الذاتي الجُزَيئي على أسلاك ذهب نانوية.

يعمل هذا الجُزَيء بالطريقة التالية: عندما يتجاوز مجموع الجهد الكهربائي المطبَّق على الأسلاك النانوية العليا واليسرى عتبة معيّنة، يُحقن إلكترون إضافي من السلك اليميني في جزيرة الشَرَك، فيفتح حقل الإلكترون الكهروساكن الترانزستور الوحيد الإلكترون موصلاً الأسلاك اليمنى والعليا معاً. وتبقى هذه الوصلة قائمة إذا حصل انخفاض مؤقت في الجهد المطبَّق، لأن الإلكترون المأسور في الشرَك يحتاج إلى وقت للخروج منه. وتكون النتيجة أن التجهيزة تعمل كمفتاح قلّاب ذي مدخلين، وهذا يمثّل من حيث المبدأ خلية ذاكرة لبت واحدة تتحكَّم فيها إشارتا المدخلين[117].

## الشبكات العصبونية البنية

تُظهر دراسات أخرى أن تلك التجهيزة التي نوقشت آنفاً، قد تُمكِّن حين عملها مع ترانزستورات سيموس من إيجاد تنوّع كبير من الدارات المتكاملة الكثيفة الوظائف. ومن هذه الدارات، ثمة طائفة من الشبكات العصبونية الموزَّعة التصالبية، تبدو واعدة (انظر الشكل 5 ـ 26). الشبكة التصالبية من حيث المبدأ هي سطح كبير من

البلاطات المتشابهة أو «اللوحات» (Plaquettes) التي تتخللها في بعض المواضع تماسات مع «خلايا رمادية» متوضعة فوق طبقة السيموس الأساسية. في هذا البنيان المستوحى من النظم الحية، تعمل المفاتيح القلّابة (المرسومة على شكل دوائر وأسهم) «كعقد عصبونية» متكيّفة تصل بين الأسلاك النانوية «العصبية» والأسلاك النانوية المعامدة لها. والخلايا، التي هي من حيث الجوهر مضخّمات عمليات لاخطّية، تعمل كأجسام خلايا عصبونية.




**الشكل 5 ـ 26: شبكة تصالبية موزَّعة مكوَّنة من صفيفة جزيئات وأسلاك نانوية تتقاطع في بعض النقاط مع تماسات خلايا نصف ناقلة.**

يأتي الحافز لاستخدام الشبكات العصبونية من المقارنة الشهيرة بين حواسيب اليوم الرقمية والنظم العصبونية الحية حين تنفيذهما واحدة من أبسط المهام، هي تعرُّف الصورة (أو بدقة أكبر، تصنيف الصور). يُدرك دماغ الثدييّات صورة مرئية معقّدة، بدقة عالية، خلال ما يقارب 100 ميلي ثانية. ونظراً إلى أن عملية الاتصال الأساسية بين خلية عصبية وأخرى تستغرق 30 ـ 10 ميلي ثانية، فإن ذلك يعني أن العملية تستغرق بضع عمليات أساسية فقط. بالمقارنة، فإن أسرع معالج صغرّي حديث، يقوم بعمليات حسابية عند تردّد يصل إلى بضعة جيغا هرتز، ويستخدم أفضل برمجيات متوافرة تجارياً، يحتاج إلى دقائق عدّة (نحو $10^{11}$ دور ساعة) لإنجاز تصنيف غير جيد لصورة مألوفة. إن الفارق مذهل حقاً.

لا تحتاج الشبكات العصبونية البنية إلى البرمجيات المعتادة، لكنها تحتاج إلى تدريب لتؤدّي مهامها. وفي حالة الشبكات التصالبية، الصعوبة الرئيسة هي أن النفاذ من الخارج إلى العقد العصبونية إفرادياً يُعتبر مستحيلاً.

يمكن للنجاح في تعرُّف الصور أن يؤدّي إلى رقاقات شبكات تصالبية صغيرة نسبياً قد تُحدِث ثورة في حقل تحليل الأشكال، وعلى وجه الخصوص في تطبيقات مهمة من قبيل كشف سمات معيّنة، كدبابة في صورة فضائية مثلاً.

### الارتقاء الذاتي

إن نجاح تعرُّف الصور ورقاقات الشبكات التصالبية يمكن أن يمهِّدا الطريق أمام أغراض أخرى أشدّ طموحاً. إنه لمن المعقول أن نقول إن نظاماً يقوم على الشبكات التصالبية من مقاس اللحاء الدماغي، أي ركيزةَ سليكون مقاسها 30 × 30 سم$^2$ وتحتوي على

$10^{10}$ عصبونات و$10^{15}$ عقدة عصبونية، يمكن أن يكون قادراً، بعد تدريب أولي من قبل مدرِّب خارجي متفرغ للمهمة، على التعلُّم مباشرة من تفاعله مع بيئته. في هذه الحالة نحن نتحدث عن نظام «ذاتي الارتقاء».

في علم الحاسوب، تُعتبر المفاهيم التي من قبيل الحوسبة التطورية، والخوازميات التطورية، والعتاديات الارتقائية معروفة تماماً. إلا أنه بوجود دارات السيمول، ثمة فرصة لدمج هذه الأفكار مع الطاقة الحسابية الهائلة للدارات العالية التكامل المتوازية العمل.

يمكن لمثل هذا الارتقاء أن يؤدّي إلى تطور ذاتي لخصائص متقدمة كالإدراك الذاتي (الوعي) والتعليل. فإذا حصل نجاح كبير في هذه الاتجاهات على أرض الواقع، كان له أثر عميق، ليس في تقانة المعلومات فحسب، بل في المجتمع بأسره[118][119].

## الهوامش


1. V. Colvin, «Measuring the Risks of Nanotechnology,» *Technol. Rev.*, 71-73 (2003).
2. M. C. Roco, *Nanotech Briefs*, 5-6 (2003).
3. H. Gleiter, «Nanostructured Materials - State-of-the-Art and Perspectives,» *Zeitschrift Fur Metallkunde*, 86(2), 78-83 (1995).
4. W. A. Goddard III [et al.], eds., *Handbook of Nanoscience, Engineering, and Technology* (Boca Raton, FL: CRC Press, 2003).
5. K. E. Gonsalves [et al.], «Molecularly Designed Ultrafine Nanostructured Materials,» *Mater. Res. Soc. (MRS) Symp. Proc.*, San Francisco, CA, 351, 477 (April 4-8 1994).
6. R. W. Siegel, «Synthesis and Properties of Nanophase Materials,» *Mater. Sci. Eng.*, A168, 189-197 (1993).
7. H. Hahn and K. A. Padmanabhan, «Mechanical Response of

Nanostructured Materials,» *Nanostructured Materials*, *Elsevier Science Ltd*., 6 (1-4), 191-200 (1995).
8. H. Gleiter, in: N. Hansen, T. Leffers and H. Lilholt, eds., *Proc. Second Rise Int. Symp. on Metall. and Mater. Sci*., Reskilde, Denmark, 1981, p. 15.
9. Metal Chips Ahoy, *Machine Design*, October 10, 2002, p. 47.
10. http://www.rpiedu/web/campus.News/ aug 02/ aug_26/ ajayan.html.
11. Nanocrystals Hold Key to Lower-Cost Superplasticity Parts, *Design News*, August 2, 1999, p. 20.
12. http:/ /www.jhu.edu/news_info/news/home03/ju103/twinning.html.
13. G. M. Chow, «Polyol Process Yields Nanocrystalline Co-Cu Powders,» *HighTech Materials Alert*, November 10, 1995, pp. 3-4.
14. J. Y. Ying, *Surface Structure of Nanocrystalline Oxides, NATO Study Insti.on Nanophase Materials: Synthesis, Properties, Applications* (Cambridge, MA: MIT, June 1993).
15. S. Q. Xiao [et al.], «Nanocrystalline Titanium Aluminide,» *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(7), 2535-2545 (1994).
16. J. Mazumder [et al.], «Synthesis of Nanocrystalline Nb-Aluminides by Laser Ablation Techniques, Illinois Univ. at Chicago Circle,» *NTIS Alert*, 97 (11), 15 (1997).
17. J. Y. Ying, Nanocrystalline Processing and Interface Engineering of $Si_3N_4$ Based Nanocomposites, Cambridge, MA: MIT, *NTIS Alert*, 97(11), 19, 1997.
18. H. Gleiter, «Microstructure,» in: R W. Cahn and Haasen, P., eds., *Physical Metallurgy*, 4th ed. (London: Elsevier Science, 1996), p. 844.
19. Gleiter, H., *Progress in Materials Science*, 33, 223, 1989.
20. U. Betz and H. Hahn, *Nanostructured Materials*, 12, 911 (1999).
21. H. Hahn and Averback, *R 5*., *J. Am. Ceram. Soc*. 74, 2918 (1991).
22. M. J. Mayo, in Hori, S., Tokizane, M., and Furushiro, N. (eds.), *Superplasticity in Advanced Materials, The Japan Society for Research on Superplasticity,* Japan, 1991, p. 541.
23. H. Hahn and R. S. Averback, *Nanostructured Materials*, 1, 95 (1992).

24. E. Wakai,, Sakaguchi, S., and Matsuno, Y., *Adv. Ceram. Mater.*, 1, 259, 1986.
25. A. J. Allen [et al.], *J. Am. Ceram. Soc.*, 79, 1201 (1996).
26. Yan, M. F, Solid State Sintering, in Schneider, S. J., (chairman), Engineered Materials Handbook, vol. 4, «Ceramics and Glasses,» ASM Int., 1991, p. 304.
27. W. D. Kingery, H. K. Bowen,, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd ed. (New York: Wiley, 1976).
28. Y.-M. Chiang, D. Birnie and W. D. Kingery, *Physical Ceramics Principles for Ceramic Science and Engineering* (New York: Wiley, 1997).
29. I.-W. Chen, X.-H. Wang, *Nature*, 404, 168 (2000).
30. H. Hahn, J. Logas and Averback, *R. S., J. Mater. Res.*, 5, 609 (1990).
31. Mayo, M. J., Material Design, 14, 323, 1993.
32. S. C. Liao [et al.], *Nanostructured Materials*, 10, 1063 (1998).
33. H. Hahn, *Nanostructured Materials*, 2, 251 (1993).
34. G. Skandan, «Processing of Nanostructured Zirconia Ceramics,» *Nanostructured Materials*, 5, 111 (1995).
35. G. Skandan,, *Mater. Lett.*, 20, 305 (1994).
36. G. Skandan [et al.], *J. Am. Ceram. Soc.*, 77, 1706 (1994).
37. V. V. Srdic, M. Winterer and H. Hahn, *J. Am. Ceram. Soc.*, 83, 729 (2000).
38. Srdic,, Winterer, M., and Hahn, H., J. *Am. Ceram. Soc.,* 83, 1853 (2000).
39. V. V. Srdic [et al.],, *J. Am. Ceram.*
*Soc.,* 84, 2771 (2001).
40. Benker, A., Diploma thesis, Darmstadt, 1999.
41. Winterer, M., *Nanocrystalline Ceramics: Synthesis and Structure,* (Berlin: Springer, 2002).
42. H. Gleiter, *Progress Mater. Sci.*, 33 (4), 223 (1989).
43. R. Birringer, *Mater. Sci. Eng.*, A117, 33 (1989).
44. Suryanarayana, and Froes, *F. H., Metall. Trans.,* A 23A, 1071, 1992.
45. C. Siegel, R W., *Nanostructured Materials,* 3, 1 (1993).
46. Shull, R. D., *Nanostructured Materials,* 2, 213 (1993).
47. Niihara, K., Nakahira, A., and Sekino, T., New Nanocomposite Structural Ceramics, *MRS Symp. Proc.,* 286, 408-412, 1993.

48. Nakahira, A. and Niihara, K., *J. Ceram. Soc.,* Japan, 100, 448, 1992.
49. Izaki, K., Hakkei, K., Ando, K., and Niihara, K., *Ultrastructure Processing of Advanced Ceramics,* J. M. Mackenzie and D. R Ulrich (Eds.), New York: John Wiley & Sons, 1980, p. 891.
50. T. Sekino,, Nakahira, A., Suzuki, Y., and Niihara, K., *J. Japan Powd. Powd. Met.,* 43(3), 272-277, 1996.
51. T. Sekino [et al.], *Proc. Aust. Ceram. Soc.* '92, Melbourne, 1992, p. 745.
52. Levin, I., Kaplan, W. D., and Brandon, D. G., Effect of SiC Submicrometer Particle-Size and Content Alumina-SiC Nanocomposites, *J. Am. Ceram. Soc.,* 78(1),254-256, 1995.
53. JPRS-JST-94-011L, March 25, 1994, pp. 16-18.
54. B. M. Novak, «Hybrid Nanocomposite Materials between Inorganic Glasses and Organic Polymers,» *Adv. Mater.*, 5 (6), 422-433 (1993); *NTIS Alert,* 96(7), 18-19, 1996.
55. W. Dressler [et al.], «Fabrication of Nanostructured Ceramics by Hybrid Processing, Nanostructured Materials,» 6 (1-4), 481-484 (1995).
56. G. B. Prabhu and D. L. Bourell, «Synthesis and Sintering Characteristics of Zirconia and Zirconia-Alumina Nanocomposites,» *Nanostructured Materials*, 6 (1-4), 361-364 (1995).
57. A. Jalowiecki [et al.], «Designing of $Si_3N_4$/SiC Composite Materials,» *Nanostructured Materials*, 6 (1-4), 279-282, (1995).
58. A. Rousset, «Alumina-Metal (Fe, Cr, Fe0.8 Cr0.2) Nanocomposites,» *J. Solid State Chem.*, 11 (1), 164-171 (1994).
59. *«AFRL Technology Horizons,»* (March 2003), pp. 29-32.
60. D. J. Chaiko, A. Leyva and Niyagi, 5., «Nanocomposite Manufacturing, «*AM&P* (June 2003), pp. 44-46.
61. http://www.polyone.com(www.netcomposites.com/news.asp?151O, accessed January 14, 2003, p. 3.
62. J. W. Connell, Smith, Jr., J. G., and Park, C, (NRC), Organic/Inorganic Hybrid Polymer/Clay Nanocomposites, NASA LRC, Hampton, VA, *Nanotech Briefs,* October 2003, pp. 11-12.
63. Sato, H. and Kagawa, Y., *Jap. Soc. Composite Mater.,* Tokyo, 663, 1995.

64. Naganuma, T., Iba, H., and Kagawa, Y., *J. Mater. Sci. Lett.,* 18, 1587, 1999.
65. Y. Kagawa [et al.], *Acta Mater*., 46 (1), 265 (1998).
66. T. Naganuma and Y. Kagawa, *Composites Sci. Tech*., 62 (9), 1187 (2002).
67. A. Shi, H. Zhou and D. E. Edwards, «Optical Nanocomposite is Suited for Photonics Packaging, Laser Focus World,» (October 2003), pp. 93-96.
68. M. Mikrajuddin [et al.], *J. Electrochem. Soc*., 149 (5), 107, 2002.
69. M. Mikrajuddin [et al.], *J. Chem. B*, 107, 1957 (2003).
70. A. S. M. A. Haseeb, J. P. Celis,, and J. R. Roos, « An Electrochemical Deposition Process for the Synthesis of Laminated Nanocomposites,» *Mater. Manufactur. Proc*., 10 (4), 707-716 (1995).
71. D. Powell, «Nanotechnology in Space,» *NASA Tech Briefs* (September 2003), p. 19.
72. K. Kincade, «Nano,» Takes Its First Real Steps into the Industrial World,» *Laser Focus World* (September 2003), pp. 73-78.
73. B. H. Kear and P. R. Strutt, «Chemical-Processing and Applications for Nanostructured Materials,» *Nanostructured Materials*, 6 (1-4), 227-236 (1995).
74. P. R. Strutt and R. F. Boland, University of Connecticut, private communication, 1994.
75. L. E. McCandlish [et al.], *Protective Coatings: Processing and Characterization*, Edited by R. M. Yazici (Warrendale, PA: The Metallurgical Society, 1990).
76. R. W. Bretzman [et al.], «Nanomaterials and Wear Resistant Polymers,» *Ceramic Industry* (June 2000), pp. 39-43.
77. L. Bruno, «Nanotechnology, Red Herring,» (March 2003), pp. 50-51.
78. A. Zeichick, «The Fabric of Consumer Reality, Red Herring,» (March 2003), p. 54.
79. C. Tristram, «Reinventing the Transistor,» *Technology Review* (September 2003), pp. 54-62.
80. T. Yamada, «Nanoelectronic Devices with Precise Atomic-Scale Structures,» *NASA Tech Briefs* (March 2002), pp. 43–44.

81. Biever, C, Behind the Looking Glass, Red Herring, March 2003, p. 58.
82. V. V. Tsukruk and E. R. Zubarev, *Langmuir* (16 September 2003).
83. J. Mark [et al.], «Nanoparticles Make Silicone Rubber Clearly Stronger,» *J. Polymer Sci. Part B: Polymer Phys.* (15 August 2003).
84. M. Haruta, *Catal. Today*, 36, 153 (1997).
85. M. Haruta and M. Date, *Appl. Catal. A,* 222, 427 (2001).
86. G. C. Bond and D. T. Thompson, *Gold Bull.,* 33, 41 (2000).
87. G. C. Bond, *Gold Bull.*, 34, 117 (2001).
88. A. C. Templeton, W. P. Wuelfing and R. W. Murray, *Acc. Chem. Res.*, 33, 27 (2001).
89. R. M. Crooks, *Acc., Chem. Res.*, 34, 181 (2001).
90. D. R. Rolison, *Science*, 299 (2003), p. 1698.
91. Nanoengineered Membranes, *Machine Design* (5 September 2002), p. 32.
92. Carbonitride Nanoparticles Strengthen Steel Against Creep, AM&P, October 2003, p. 11.
93. www.nsf.gov/od/lpa/news/03/pr0368.htm. accessed July 8, 2003, p. 1.
94. M. Cauchetier [et al.], «Laser Synthesis of Nanosized Powders,» in: A. Legrand and S. Senemaud, eds., *Nanostructured Silicon-Based Composite*s (New York: Taylor & Francis, 2002), pp. 6-23.
95. M. Cauchetier, «Nanometric Si/C/N Composite Powder: Laser Synthesis and IR Characterisation,,» *Eur. Ceramic Soc.*, 8, 215 (1991).
96. R. DeMeis,» Take a (Nano) Powder!,» *Design News* (1 March 1999), pp. 143-144.
97. B. R. Murphy and T. H. Courtney, «Synthesis of Cu-NbC Nanocomposites by Mechanical Alloying, Michigan Technological University,» *NTIS Alert*, 95 (19), 50 (1995).
98. New «Nanopowders,» for Super-Strength Components, *Mater. Perform.,* 36(4), 76, 1997.
99. Hellstern, E. [et al.], *J. Appl. Phys.*, 65, 305 (1988).
100. H. Fecht, *Met. Trans.*, 21A, 2333 (1990).
101. M. Oehring and R. Borman, *Mat. Sci. Engr.*, A134, 1330 (1991).

102. M. Trudeau and R. Schulz, *Mat. Sci. Engr.*, A134, 1361 (1991).
103. A. Calka and A. P. Radlinski, *Mat. Sci. Engr.*, A134, 1350 (1991).
104. C N. J. Wagner, E. Yang and M. S. Boldrick, Structure of Nanocrystalline Fe, W, and NiAl Powders Prepared by High-Energy Ball Milling, Nanostructured Materials, 71-2, January-February 1996, Pergamon Press, Conf. Proceedings of TMS-AIME Symp. on the Struct. and Prop. of Nanophase Materials, 1995.
105. M. L. Yang and T. Yadav, «Rapid Densification of Ceramic Monoliths and Composites,» *NASA Tech Briefs* (October 1998), pp. 69-70.
106. G. Au, W. Lei, W. and T. Yadav, « Thermal Batteries Made with Nanostructured Material,» *NASA Tech Briefs (*April 1999), pp. 28-30.
107. http://link.abpi.net/l.php?20030121A3,Accessed January 21, 2003.
108. «Tightening His Nanobelt,» *Design News* (18 June 2001), p. 23.
109. http://link.abpi.net/l.php?20021003A2,Accessed October 3, 2002, p. 1.
110. W. Chang [et al.], *Nanostructured Materials*, 4, 507 (1994).
111. http://www.netcomposites.com/news.asp?1272. pp. 1-2.
112. «Carbon Nanocapsules Grown on Carbon Fibers, «*JETRO* (13 August 1995).
113. «Self-Assembling Nanospheres Show Industrial and Medical Promise,» *Machine Design* (5 August 1999).
114. S. I. Stupp, «Nanofiber Material Developed to Repair Bone Fracture,» *AM&P*, 160(2), 26 (2002).
115. J. C. Diop, «Nanoceramics, » *Technol. Rev.* (December 2002/January 2003), p. 65.
116. «Nanoantennas,» *Machine Design* (10 October 2002), p. 56.
117. K. K. Likharev, «Hybrid Semiconductor - Molecular Nanoelectronics,» *The Industrial Physicist* (June/July 2003), pp. 20-23.
118. K. K Likharev,, Electronics Below 10 nm, The Industrial *Physicist,* June/July 2003, p. 23, and Nano and Giga *Challenges in Microelectronics;* Amsterdam: EIsevier, 2003, http://

rsfq1.physics.sunysb.edu/likharev/nano/ NanoGiga031603.pdf.
119. K. K. Likharev, A. Mayr, Türel, and Muckra, I., Cross-Nets: High-Performance Neuromorphic Architectures for CMOL Circuits, *The Industrial Physicist,* June/July 2003, p. 23.

# المراجع

Avouris, P. and J. Appenzeller. «Electronics & Optoelectronics with Carbon Nanotubes.,» *The Industrial Physicist*: June/July 2004, pp. 18-21.

Bill, J., E. Wakai and F. Aldinger. *Precursor-Derived Ceramics*. New York: WileyVCH, 1999.

"Carbon Nanotube Commercial Manufacturing Breakthrough.,» http:/ /www.thomasswan.co.uk, p. 1.

Carson, R. T., H. S. Savage and J. M. Rigsbee. « PVD Fabrication of Nanocrystalline Composite Materials, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Adv. Construction Technology Center.,» *NTIS Alert*: 96 (4), 28, 1996.

Corti, C. W./ Holliday, R. J./ and Thompson, D. T./ Developing New Industrial Applications for Gold: Gold Technology, *Gold Bull.,* 35/4/ 111-117/2002.

Eleskandarany, M. S., M. [et al.]. «Synthesis of Full-Density Nanocrystalline Tungsten Carbide by Reduction of Tungstic Oxide at Room Temperature.,» *Metall. Mater. Trans., A-Phys. Metall. Mater. Sci.*: 27 (12)/ 4210-4213, 1996.

Fendler, J. H. «Chemical Self-Assembly for Electronics Applications.,» *Chem. Mater.*: 13, 3196-3210, 2001.

"Fluid Nanostructuring.,» *The Industrial Physicist*: June/ July 2003. p. 11.

Gonsalves, K. :Nanostructured Bearing Alloy Studies, University of Connecticut, Storrs Institute of Materials Science.,» *NTIS Alert*: 96 (6), 47, 1996.

Goursat, P. [et al.]. «Processing and Tailoring of Si/C/N-Based

Nanocomposites.,» in: A. Legrand and S. Senemaud (eds.). *Nano Structured Silicon-Based Composites*. New York: Taylor & Francis, 2002, pp. 238-264.

http://F'orbes.z2c.net / rd4/ ck / 3072 -13370-1839-183 ?m = 8-8&e = fef9626194f6; SCIENCE: GREY GOO THEORY.

Kear, B. H. and L. E. McCandlish. «Nanostructured W-Base Materials; Synthesis, Processing, and Properties.,» J. *Adv. Mater*.: 25(1)/ 11-19/ 1993.

Kim, B. K., G. H. Ha and D. W. Lee. «Sintering and Microstructure of Nanophase WC/Co Hardmetals.,» *J. Mater. Proc. Technol*.: 63 (1-3), 317-321, 1997.

Kuzmany, H. [et al.]. (eds.), Molecular Nanostructures, AIP Conf Proceedings, Volume 685, XVII International Winterschool/ Euroconference on Electronic Properties of Novel Materials, Kirchberg, Tirol, Austria, March 8-15/ 2003. Melville, NY: American Institute of Physics, 2003.

"Nanocomposites from Humidifiers.,» *Machine Design*: 20 May 2004, p. 25.

"Nanoscale Technology Yields Better Thermal Insulators.,» *Machine Design*: 1 April 2004, p. 37.

"Nanosized Conveyor Belt.,» *Machine Design*: 3 June 2004, p. 43.

Niihara, K./ The Centennial Memorial Issue of the Ceramic *Society of Japan,* 99(10)/ 974/ 1991.

Nottingham Research Could Lead to New Range of Nanostructures, p. 1/ accessed September 12/ 2003; http://www.nottingham.ac.uk/public-affairs/pressreleases/ index.phtml ?menu = pressreleases.

Ogino, Y., T. Yamasaki and B. L.Shen. «Indentation Creep in Nanocrystalline 26Fe- Tin and Ni-Tin Alloys Prepared by Mechanical Alloying.,» *Metall. Mater. Trans., B-Process* Metall. *Mater. Proc. Sci*.: 28 (2), 299-306, 1997.

Ouellette, J. «Seeing with Sound.,» *The Industrial Physicist*: June/ July 2004, pp. 14-17.

Park, J. [et al.] «Coulomb Blockade and the Kondo Effect in Single-Atom Transistors.,» *Nature*: 417, 722-725, 2002.

People: Richard Feynman, http:/ /forbes.z2c.net/rd4/ck/3072-13370-1839-183? m = 7-8&e = fef9626194f6.

POLICY: NANO MISCONCEPTIONS; http:/ /forbes.z2c.net/ rd4/ ck/3072-133701839-183?m = 14-8&e = fef9626194f6.

Pradhan, S. K., Datta, A., and Pal, M., Synthesis of Nanocrystalline Ni3Cu by Sol-Gel Route.,» *Metall. Mater. Trans., A-Phys. Metall. Mater. Sci.*: 27 (12), 4213–4216, 1996.

Rawers, J [et al.].,» Microstructure and Tensile Properties of Compacted Mechanically Alloyed, Nanocrystalline Fe-Al, Metall. Mater. *Trans., A-Phys. Metall. Mater. Sci.,* 27(10), 3126-3134, 1996.

Sajgalik, P. [et al.]. *G., Mater. Res. Soc. Symp.*: 287, 335. 1996.

Sienko, T. [et al.]. *Molecular Computing*. Cambridge, MA: The MIT Press, 2003.

Solin, S. A. «Magnetic Field Nanosensors.,» *Scientific American:* July 2004, pp. 71-77www.sciam.com.

Sporn, D., E. Raether and S. Merklein. «Preparation and Properties of Sol-Gel Derived Nanostructured Thin Ceramic Layers, Materials Science and Engineering, A - Structural Material Properties.,» *Microstructure and Processing*: 168 (2), 205-208, 1993.

Ying, J. Y. *Nanocrystalline Processing and Interface Engineering of* $Si_3N_4$*-based Ceramics*. MIT, Cambridge, MA, *NTIS Alert*, 96 (6), 13, 1996.

# 6

# تعدين المسحوق

## تقديم

### تعاريف

خلافاً للتقنيات الأخرى المستخدمة في تشكيل المعادن، تُشكَّل القطع في تقنية تعدين المساحيق مباشرة من المساحيق. وتَستخدم سيرورة مسحوق المعدن الضغط والحرارة لتكوين قطع ذات أشكال قريبة من النهائية. وفي هذه السيرورة، يُرصُّ مسحوق المعدن في قالب صلب دقيق الأبعاد تحت ضغط يصل إلى 50 طن/ إنش$^2$. وبعد كبس المسحوق، يُخرج من القالب ويُدخل ببطء إلى فرن عالي درجة الحرارة، وفي جوّ متحكّم به، حيث تترابط الجُسيْمات مندمجة أو متلبدة معاً عند درجات حرارة أدنى من درجة حرارة انصهار المعدن[1].

صحيحٌ أن سيرورة المسحوق المعدني تُستخدم لصنع قطع من أي معدن تقريباً، إلا أن ما هو أكثر شيوعاً هي الخلائط القائمة على الحديد أو النيكل أو القصدير أو النحاس أو المعادن الحرارية من قبيل التنغستين والتنتالوم. ومن المعادن الأخرى المتوافرة الألمنيوم

والفولاذ غير القابل للصدأ، والنيكل أو الخلائط الفائقة القائمة على الكوبالت. أما جُسيْمات المساحيق فلها أشكال مميَّزة بمقاسات تتراوح بين 0.1 و1000 ميكرون.

أصبحت القطع العالية الدقة المصنوعة من مساحيق المعادن متوافرة منذ سنوات عديدة، إلا أن محدوديات في خواصها الميكانيكية حدَّت في وقت ما من استخدامها. فالقطعة المسامية المنخفضة الكثافة لن تكون قوية أو مقاومة للتآكل كنظيرتها المعدنية المطرّقة. أما الآن، فقد تغيَّر الحال بالنسبة إلى القطع المصنوعة من مساحيق المعادن التي تخضع إلى التطريق الحار (Hot Forging) ضمن قوالب مغلقة، أو التي تُنتج بالكبس الحار المتساوي الضغط، أو التي تُقولَب بحقن المعدن. فالقطع التي تُصنع بهذه الطرائق، ضمن ظروف إنتاج تحقِّق كثافة تساوي 100 في المئة من الكثافة النظرية، تُعتبر مكافئة لنظيراتها من الفولاذ المطرَّق، أو حتى أفضل منها.

على سبيل المثال، تُعتبر القطع المعقّدة نسبياً، المصنوعة من خلائط الفولاذ المكربن، أو المنخفض نسبة الخلط، مثالية للإنتاج الكمي بتقانة «تطريق القطع المحضرة من المسحوق»، أو ما يُعرف اختصاراً باسم «تطريق المسحوق» (Powder Forging). وبرغم أن تطريق المسحوق ليس سيرورة جديدة، إلا أنها فرضت، مع القولبة بحقن المعدن والكبس الحار المتساوي الضغط، اهتماماً كبيراً بها في السنوات الأخيرة. وكان مصنِّعو السيارات أول من أدرك مزايا القطع المصنوعة بتطريق المسحوق التامة الكثافة. وتعمل القطع الجديدة من هذا النوع الآن في عدد من المحرّكات وآليات وتوابع نقل الحركة المختلفة.

ومن الوسائل الأخرى لتحسين أداء القطع هي إضافة الكربون إلى مسحوق الفولاذ. تجعل هذه الإضافة القطع المصنوعة من

مسحوق المعدن قابلة للمعالجة الحرارية التي تزيد قساوة القطعة ومتانتها ومقاومتها للاهتراء والشد. وتحسِّن إضافة عناصر خالطة إلى مسحوق الحديد أيضاً خواص القطع المصنوعة من مسحوق الفولاذ المعالجة حرارياً.

مع القرن الحادي والعشرين، ترسَّخت سيرورة تعدين المسحوق بوصفها صناعة قوية قائمة على التقانة. لم تكن الأسس الاقتصادية والتقانية لهذه الصناعة أفضل مما هي عليه الآن قط. فهي تتطور في جميع القطاعات: «الكبس والتلبيد» المعهودين، والقولبة بحقن المعدن، وتطريق المسحوق، والتشكيل الحار، والكبس الحار المتساوي الضغط، والتشكيل بالبخ، وفي المواد الجسيمة المتقدمة[1].

---

## المواد

يمكن لتقنية تعدين المسحوق أن تُنتِج خلائط من الصعب أو المستحيل إنتاجها بسيرورات السكب المعهودة. في هذا الفصل، سوف نُركِّز الاهتمام في أحدث أنواع المواد المستخدمة في سيرورة تعدين المسحوق بدلاً من الفولاذيات[3] والنحاسيات وخلائطها المعروفة.

### خلائط التيتانيوم

طوَّرت مختبرات شركة تويوتا المركزية في اليابان (Toyota Central Labs Inc.) خليطة تيتانيوم لدنة فائقة المرونة، تتصف بمُعَامل يونغ منخفض ومقاومة شدّ كبيرة. وقد مكَّنت خواص المرونة فيها من تشغيلها على البارد حتى 99.9 في المئة عند درجة حرارة

الغرفة، ويمكن زيادة مقاومتها للشدّ حتى 2100 ميغا باسكال بتعريضها إلى معالجة حرارية بسيطة. وسُمِّيت المعدن GUM، وهي خليطة مسحوق معدني بيتا من التيتانيوم ذات بنية تكعيبية ممركزة الجسم مركَّبة من $Ti_3(Ta+Nb+V)+(Zr, Hf, O)$.

لكن معامل مرونتها ليس ثابتاً، فهي تتصف بتشوّه مرن لاخطي، مع معامل يونغ بين 20 و60 جيغا باسكال، تبعاً لمقدار التشغيل على البارد. ومع ازدياد قيمة مقاومة الخضوع (Yield Strength)، لا تبدي الخليطة زيادة في القساوة تنجم عن التشغيل، ويصبح التشوُّه المستمر ممكناً حتى أي مستوى.

أما خواصها فتقوم على بنيتها النانوية الاستثنائية. لم تُرَ انفصامات أو بلّورات مزدوجة بعد التشغيل البارد. بدلاً من ذلك، تتحوَّل الخليطة إلى بنية ذات عروق تحتوي على بُنى طبقية فراكتالية (Fractal) مع حقل انفعال (Strain Field) متقطع، وشبكة بلّورية محدّبة بدرجة كبيرة. ويُقدَّر أن آلية تشوُّه لدن غير معروفة تُولِّد خواصها الاستثنائية المختلفة كلياً عن تلك التي للمواد المعدنية الأخرى.

من التطبيقات الحالية لهذه الخلائط إطارات النظارات والبراغي الدقيقة. ومن التطبيقات المحتملة، كثيرٌ من قطع السيارات والتجهيزات الطبية والسلع الرياضية ومواد التزيين والمكوِّنات الجوية الفضائية.

### متعدّدات المعادن

دُرس الخلط الميكانيكي والبثق الحار بوصفهما وسيلتين للتقسية بالجُسيْمات (Dispersion Hardening) لمركَّب متعدّد المعادن يقوم على $Ni_3Al$-B ويتكوَّن من مزيج مساحيق عنصرية. وكان الأُكسيد الذي استُخدمت جُسيْماته للتقسية هو الزركونيا المثبّتة جزئياً. في أثناء الخلط الميكانيكي، تطوَّرت البنية الميكرويّة وفقاً للمراحل المميِّزة

الموجودة في نظم الخلط الميكانيكي الأخرى. وتطلّب استكمال تفاعل الخلط 16 ساعة، بدأ بعدها ضياع الخاصية البلّورية. وتطابقت الملاحظات التجريبية الخاصة بتنعيم الحُبيْبات في أثناء الخلط الميكانيكي مع توقّع يقوم على نموذج موجود. فبالمقارنة مع الخلط بواسطة المخروط V، أنتج الخلط الميكانيكي توزُّعاً متجانساً لجُسيْمات التشتيت الدقيقة. ونتج من بنية الحُبيْبات المنقّحة والجُسيْمات المشتّتة مقاومة للشدّ كبيرة على مجال واسع من درجات الحرارة.

يُظهر الجدول 6 ـ 1 التركيب الكيميائي للخليطة مع نسب المساحيق التي استُخدمت في هذه الدراسة. ويبيّن الشكل 6 ـ 1 تسلسل إجراءات التجربة. يُبيِّن هذا العمل أن الزركونيا الناعمة المثبّتة جزئياً تمثل مرشَّحاً ممكناً للتقسية بالجُسيْمات للمركَّبات المتعدّدة المعادن القائمة على $Ni_3Al$-B.

**الجدول 6 ـ 1**: التركيب الاسمي لخلائط تجريبية[5]

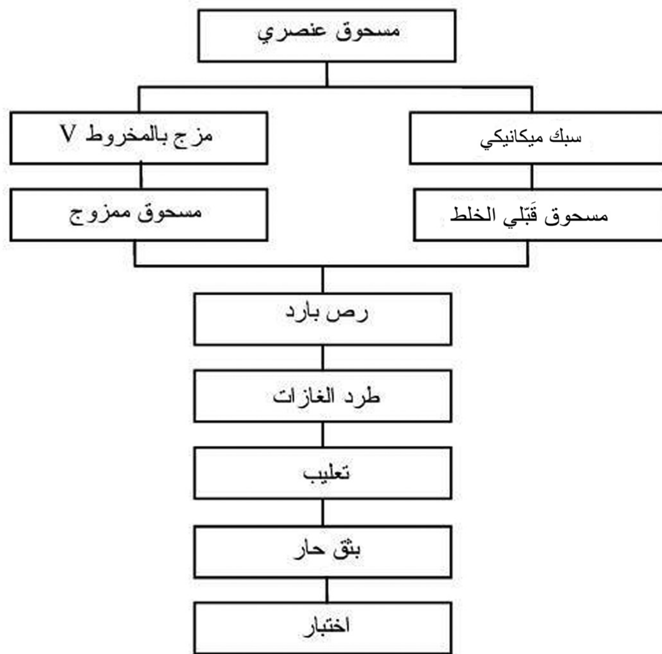
| | التركيب ( في المئةو) (أ) | | | |
|---|---|---|---|---|
| الخليطة | نيكل | ألمنيوم | بورون | زركونيا مج (ب) |
| $Ni_3Al$ | 87.4 | 12.60 | - | - |
| $Ni_3Al$-B | 87.3 | 12.60 | 0.10 | - |
| $Ni_3Al$-B-PSZ | 85.0 | 12.35 | 0.15 | 2.5 |

**ملاحظة**: (أ) مقاس الجُسيْم الوسطي بالميكرون: نيكل 4.5، ألمنيوم 5، بورون 1، زركونيا مثبتة جزئياً 0.3.

**(ب)** زركونيا مثبتة جزئياً: 3 في المئةم $ZrO_2 + Y_2O_3$.

وفي السنوات الأخيرة، أصبح الناس مهتمين كثيراً بالمركَّبات المتعدّدة المعادن العالية درجة الحرارة، وبخاصة الـ TiAl. تمتلك خليطة الـ TiAl خواص مغرية، كدرجة حرارة الانصهار العالية،

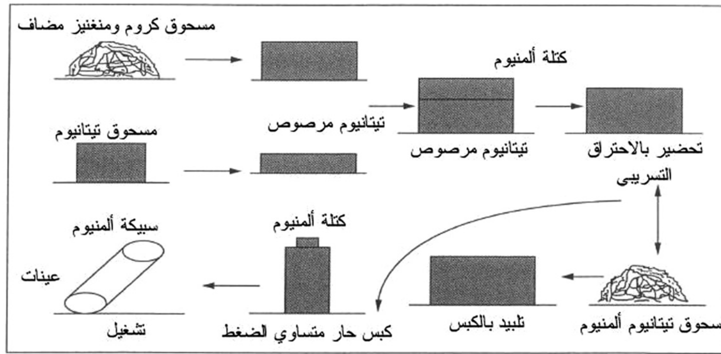
ومعامل يونغ العالي، والكثافة المنخفضة، ومقاومة التأكسد الجيدة. إنها واحدة من أكثر المواد الإنشائية وعداً في تحمُّل الحرارة العالية. إلا أن مطاوعة هذه الخلائط، ومتانة الكسر فيها عند درجة حرارة الغرفة ليستا جيدتين. فإذا أضيف ذلك إلى القابلية الضعيفة للتشكيل، أمكن فهم سبب عدم استخدامها حتى الآن في التطبيقات الجوية والفضائية. إلا أن تعديل الخليطة والتحكُّم ببنيتها الميكرويّة أدّيا إلى تحسين مطاوعتها ومتانتها في السنوات الأخيرة.




**الشكل 6 ـ 1: مخطط انسيابي لإجراءات تجربة التقسية بجُسيْمات الزركونيا المثبتة جزئياً**[5].

درس يِنجيانغ (Yinjiang) وتاو (Tao) وليان[6] (Lian) خواص الـ TiAl وتكثيفها. حيث حضَّروا مسحوقاً وخليطة TiAl ذات نقاوة

عالية، ومحتوى منخفض من الأُكسجين بطريقة التحضير بالاحتراق التسريبي (ICS) (Infiltration Combustion Synthesis) (انظر الشكل 6 ـ 2). ودرسوا تكاثف الخليطة بالكبس الحار المتساوي الضغط، وبسيرورة التلبيد والكبس المعتادة. وحصلوا على عيّنات بكثافة أكبر من 3.75 غ/سم$^3$ بالكبس الحار المتساوي الضغط عند 196 ميغا باسكال و1250 مْ مدة 3 ساعات. لقد تألَّفت البنية النانوية من حُبيْبات متساوية الأطوال المحورية مع نسبة حجمية صغيرة من البنية الصفيحية، وبيَّنت اختبارات الضغط أن مقاومة الخضوع في عيّنة الـ TiAl تساوي 646 ميغا باسكال، وأن مقاومة الضغط (Compressive Strength) تساوي 1579 ميغا باسكال، وأن مطاوعة الضغط (Compressive Ductility) تزيد على 26 في المئة. وغيّرت إضافة المنغنيز والكروم البنية، وزادت قيمة الطَور ألفا$_2$. أما كثافة المسحوق المرصوص بالتلبيد المباشر فيمكن أن تصل إلى قيمة الكثافة النظرية.




**الشكل 6 ـ 2: مخطط انسيابي لإنتاج التيتانيوم ألمنيوم بالتحضير الاحتراقي القسري.**

وبيَّنوا أنه يمكن إنتاج مركَّب الـ TiAl المتعدّد المعادن بالسيرورات الآتية: التحضير بالاحتراق التسريبي، والكبس الحار المتساوي

الضغط، والتلبيد. وأن الخواص الميكانيكية للخليطة، الملبّدة بطريقة تعدين المسحوق المعتادة، أو المصلدة بالكبس الحار المتساوي الضغط من مسحوق محضَّر بالتركيب بالاحتراق التسريبي، أفضل إلى حد ما من تلك التي لقطع الـ TiAl المصنوعة من المسحوق المذرَّر بالطرد المركزي، أو بالتحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار (Self-Propagating High Temperature Synthesis) (SHS).

## المواد المركَّبة

أدت الحاجة الملحَّة إلى مواد مركَّبة إنشائية لاستخدامها في المجال الحراري الواقع بين ذاك المغطى بمواد الحاضنات البوليمرية والألمنيومية، وذاك المغطى بالخلائط المقاومة للحرارة، إلى السعي إلى تطوير مواد ذات حاضنات من مركَّبات التيتانيوم، أو متعدّدات المعادن القائمة على التيتانيوم. لكن المشكلة الرئيسة التي يجب حلها عند التعامل مع المواد المركَّبة ذات الحاضنة التيتانيومية تتعلق بتفاعلية التيتانيوم الكيميائية عند درجات الحرارة العالية. لقد تم تجاوز هذه المشكلة بالنسبة إلى تقوية الـ SiC بتطوير ألياف SiC من خلال توضيع الأبخرة كيميائياً مع طبقات سطحية غنية بالكربون. وسمح هذا بإنتاج مواد مركَّبة SiC-Ti ذات الإمكانات الكبيرة، إلا أن هذه المواد مرتفعة الثمن نتيجة تكلفة الألياف، وتكلفة سيرورة التصنيع العاليتين.

يمكن لألياف الكربون أن تحقّق تقوية فاعلة للحاضنات التيتانيومية شريطة تطوير تقانات التصنيع الملائمة، لأن السكب المباشر مستبعد بسبب مشاكل التفاعلية الكيميائية المذكورة آنفاً. لذا اقتُرحت طريقة تصنيع بديلة لإدخال ألياف الكربون في الحاضنة التيتانيومية باستخدام خليطة أصهرية قائمة على التيتانيوم بوصفها طوراً وسيطاً[7].

في دراسة أجراها ميليكو[8] (Mileiko)، من معهد فيزياء الحالة الـصـلـبـة (Solid State Physics Institute in Chernogolovka) فـي موسكو، استنتج أن:

● خواص المرونة في المواد المركَّبة قد تأثرت جوهرياً بنظام التصنيع بسبب تكوُّن طَور كربيد التيتانيوم في ملتقى الألياف والحاضنة.

● نسبة طَور كربيد التيتانيوم قد استُمثلت.

● خواص انكسار المادة المركَّبة عند درجة حرارة الغرفة كانت أسوأ قليلاً من تلك التي لخلائط التيتانيوم الكبيرة المقاومة، مع أن إدخال تحسينات في تقانة التصنيع يمكن أن تؤدّي إلى تحسُّن في مقاومة الشدّ والمتانة إزاء الكسر عند درجة حرارة الغرفة.

● بيَّنت التطورات أن مقاومة المادة المركَّبة للشدّ على المدى القصير عند درجات الحرارة العالية باستخدام حاضنات من خلائط التيتانيوم تتفوّق على تلك التي لخلائط التيتانيوم عند درجة حرارة تساوي 700 ـ 800 مْ.

● مقاومة الزحف النوعية أفضل من تلك التي لخلائط التيتانيوم العادية[8].

## خلائط النحاس ـ حديد ـ كوبالت

عندما استُخدمت الخلائط الجديدة المكوَّنة من النحاس والحديد والكوبالت في أدوات القطع أبدت زيادة في عمر الشفرات بمقدار 30 في المئة، وفق قول بيار ألان دو شالو[9] (Pierre-Alain de Chalus) والشركة المصنِّعة Eurotungstene Poudres, Grenoble, France. تحتوي هذه الخلائط، المسمّاة Next، على نسبة لا تتجاوز

25 في المئة من الكوبالت، ويقال إنها تتصف ببنية ميكرويّة فائقة النعومة بعد الكبس الساخن. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن تخفيض درجة حرارة الكبس الساخن بمقدار 150 ـ 100 مْ، مقارنةً بحالة خلائط الكوبالت الشائعة. إلا أن مستويات القساوة تبقى نفسها تقريباً (عدد برينيل للقساوة HBN يساوي 320 من أجل Next 100، و246 من أجل Next 200).

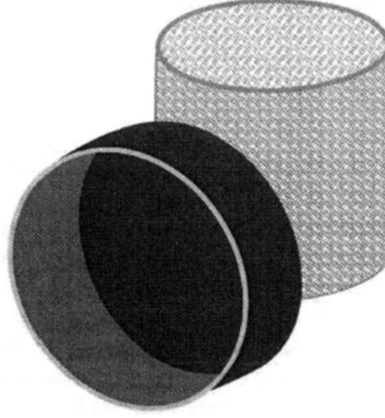
وتُصنع أدوات القطع الألماسية بتعدين المسحوق بالكبس الساخن حتى الكثافة التامة لمزيج من برغل ألماسي ومساحيق معدنية في قالب غرافيتي. وظيفة المعدن هنا هي ربط وإبقاء الألماس في الأداة أثناء عملية القطع. لذا يجب أن يتصف مسحوق المعدن أو الخليطة المنتقى بمعدل اهتراء مماثل لاستمثال أداء القطع.

كان الكوبالت عادة المادة الرابطة لأدوات الألماس، إلا أن عدم استقرار أسعاره وارتفاعها مثَّلا مشكلة. لذا صُمِّم خط Next لتجاوز تلك المشكلة، وفي الوقت نفسه لتوفير أدوات ألماس ذات خواص ميكانيكية محسَّنة. على سبيل المثال، يقال إن مقاومة خليطة Next للكشط تساوي مثلي تلك التي للكوبالت، في حين أن اختبارات الانعطاف بيّنت أن لدانتها تساوي ربع تلك التي للكوبالت.

### الرينيوم

يوفّر الرينيوم وخلائطه خواص مغرية للتطبيقات الجوية والفضائية العالية درجة الحرارة. إلا أن الطرائق المعتادة المتّبعة لصنع مكوِّنات منه مستنزفة للوقت، وعالية التكلفة. تاريخياً، كان الرينيوم يُنتَج على شكل قضبان وألواح وصفائح، وكانت تُصنع القطع من هذه الأشكال باستخدام التشغيل بالانفراغ الكهربائي (Electrical Discharge Machining) (EDM) لإنتاج الأشكال المطلوبة ضمن

حدود سماحيات معيّنة. تُعدُّ هذه الطريقة جيدة من حيث عملها، لكنها مستنزفة للوقت، ومعدل إنتاجيتها منخفض. لذا يبحث المصنِّعون عن طرائق لتحسين إنتاجيتها، وتخفيض تكاليفها.



**الشكل 6 ـ 3: مخطط انسيابي لإنتاج التيتانيوم ألمنيوم بالتحضير الاحتراقي التسريبي.**

ثمة طريقة حديثة لتعدين الرينيوم بالكبس البارد المتساوي الضغط(CIP) (Cold Isostatic Pressing) وتحويله إلى شكل شبه نهائي باستخدام مسحوق الرينيوم المعتاد. يوضع مسحوق الرينيوم في قالب مرن ذي حاوية صلبة بغية الحفاظ على الشكل المطلوب (انظر الشكل 6 ـ 3)، وتغطس مجموعة الحاوية والقالب في ماء موجود في وعاء الكبس البارد المتساوي الضغط. في سيرورة «الكيس المبلول» هذه، يُولِّد الكبس الهيدروليكي السكوني في المجال 410 ـ 210 ميغا باسكال ضغطاً متساوياً إلى القالب، فيتصلّب المسحوق آخذاً شكلاً شبه نهائي مرصوصاً غضّاً. لقد استُخدمت سيرورة الكبس البارد المتساوي الضغط لصنع قطع شبه نهائية الشكل من الرينيوم ـ إيريديوم لمحرّكات دفع صاروخية عالية الأداء تعمل بوقود دافع سائل[10].

توفِّر التقنيات المتقدمة، من قبيل بخ البلازما في الخلاء (VPS) (Vacuum Plasma Spraying)، والكبس الحار المباشر المتساوي الضغط (DHIP) (Direct Hot Isostatic Pressing)، والتصنيع الخفيف الموجَّه (DLF) (Directed Light Fabrication)، والقولبة بحقن المعدن المقدرة على إنتاج قطع شبه نهائية الشكل بكميات كبيرة بتكلفة أخفض، ومدة أقصر ومواد أقل. إلا أنها تتطلَّب مساحيق رينيوم عالية الكثافة وقليلة الأُكسجين وكروية الحُبيْبات وذات مجال واسع من مقاسات الجُسيْمات.

لكن مسحوق الرينيوم العادي هو مسحوق مكوَّن من رقائق غير منتظمة تتصف بانسياب ضعيف وتراكيز أُكسجين عالية (نحو 1000 جزء في المليون). لذا جرى تطوير سيرورة تسمّى سيرورة المسرى الدوّار، والمسرى الدوّار البلازمي بمساعدة الغاز (Rotating Electrode/Plasma Rotating Electrode Gas-Assisted) (REP/GA-REP/PREP)[10] أُنتج مسحوق رينيوم كروي الحُبيْبات ذو نسبة أُكسجين منخفضة (أقل من 50 جزء في المليون)، وكثافة ظاهرية تساوي 11 غ/سم$^3$، وكثافة مادة مربَّتة (Tap Density) تساوي 12.5 غ/سم$^3$ أو أعلى، وخواص تدفّق جيدة.

وفي برنامج تطوير آخر[1]، جرى تطوير تقنية تصليد على درجة من الأهمية لتصنيع مكوِّنات صغيرة عالية الأداء من الرينيوم، هي القولبة بحقن المسحوق (Powder Injection Molding) (PIM). توفّر هذه التقنية إمكان تكوين أشكال معقّدة متناحية شبه تامة الكثافة من دون الحاجة إلى كثير من التشغيل الثانوي.

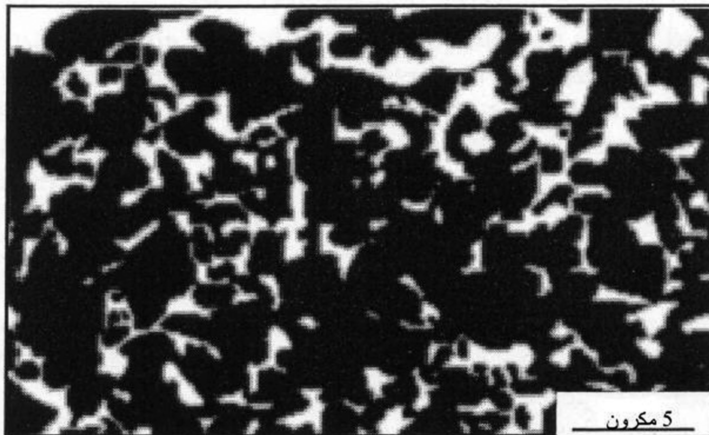
### المواد السيراميكية المعدنية

ثمة استقصاء مستمر، في أعمال البحث والتطوير، للمواد

القاسية والشديدة القساوة، ومنها المواد السيراميكية المعدنية المصمّمة لتصنيع قطع عرضة للاهتراء (في تطبيقات تتطلب متانة إزاء الكسر تفوق تلك التي يمكن الحصول عليها من السيراميكات الكتلية أو السيراميكات المقوّاة بالجُسيْمات أو الشُعَيرات). وكان ثمة اهتمام خاص بالمواد السيراميكية المعدنية التي تحتوي على ما يصل إلى 30 في المئةح من طَور رابط معدني. وبغية تصليد هذه المواد، اهتم البحث الأساسي بجانبين: تبليل الطَور ذي الجُسيْمات القاسية بمعدن سائل، والاستقرار الترموديناميكي لجُسيْمات السيراميك المتماسة مع الطَور المعدني في أثناء التلبيد.

وأحد التطوُّرات الأخيرة في هذا المجال هو تصنيع طائفة من المواد السيراميكية المعدنية تقوم على الـ $TiB_2$. تتكوَّن هذه المواد من 70 ـ 80 في المئة من حُبيْبات $TiB_2$ (مقاسها يساوي نحو 1.5 ـ 1 ميكرون) ملصوقة معاً بـ 30 ـ 20 في المئة من طَور معدني قائم على خلائط Fe-Ni-Ti-Al أو على فولاذ غير قابل للصدأ (النسب حجمية) (انظر الشكل 6 ـ 4). وبعد التلبيد العديم الضغط، عند 1450 مْ، تحقّق هذه المواد السيراميكية المعدنية 97 ـ 95 في المئة من الكثافة النظرية، وبعد الكبس الحار المتساوي الضغط عند 1350 مْ مدة ساعة تتحقَّق فيها قيمة لقساوة فيكرز تساوي 1450، وقيمة لمُعَامل تركيز الإجهادات الحدّي (Coefficient of Critical Stress Concentration) تساوي 14 ميغا باسكال م، وذلك من أجل رابط معدني نسبته الحجمية تساوي 30 في المئة، وتصبح هاتان القيمتان 1800 و11 ميغا باسكال م من أجل رابط معدني نسبته الحجمية تساوي 20 في المئة[12][11]. ووفقاً لما هو واضح من قيم القساوة والمتانة هذه، تتفوق هذه المواد على المعادن القاسية العالية الجودة WC-Co. واللافت هو أن كثافتها الإجمالية تساوي نحو 5.3 غ/سم$^3$، وأنه

يمكن تشغيلها بالانفراغ الكهربائي. لقد استُخدمت هذه البوريدات الملصوقة بالرابط المعدني لصنع مكوِّنات عدّة تتعرض للاهتراء، ومنها الولائج الذكرية والأنثوية المستخدمة كأقلام خراطة وقوالب سحب للأنابيب والأسلاك وريش تثقيب الصخور ومانعات التسرّب.




**الشكل 6 ـ 4: البنية الميكروية لمادة سيراميكية معدنية مكوَّنة من حُبيْبات** $TiB_2$ **(اللون الرمادي) وجُسيْمات** Al2O3 **(اللون الأسود) ورابط معدني** Fe/Ni/Ti/Al **(اللون الأبيض).**

## الكربيدات الملصوقة

نظراً إلى الخواص الفريدة التي تتصف بها مواد المنظومة WC-Co من حيث المتانة إزاء الكسر، فإنها شائعة الانتشار حالياً في تطبيقات صناعية متنوعة. لكن بسبب تكلفة الكوبالت العالية، كانت ثمة محاولات لإيجاد طَور لاصق معدني بديل.

اهتمت دراسات بتطوير لاصق معدني قائم على خلائط الـ Fe-Ni[13] أو Fe-Mn[14]، وبتحديد العلاقة بين موسّطات البنية الميكرويّة والقساوة والمتانة إزاء الكسر. وفي كلتا الحالتين، كانت ثمة حاجة

إلى إضافات كربونية بغية تحقيق كثافة تامة بتلبيد الطَور السائل. وقد تبيَّن أنه يجب ضبط هذه الإضافات بعناية لدرء تكوُّن كربيدات إيتا المختلطة M6C. في حالة الرابط القائم على (Fe + Ni)، تتشكل نتيجة إضافة المواد السيراميكية المعدنية (WC+(Fe-Ni-C التي يمكن تعديل البنية الميكرويّة لطَور الرابط المعدني فيها بالمعالجة الحرارية بغية زيادة المتانة. أما في ما يخص خلائط الـ Fe-Mn، فإن إضافة الكربون والموليبدن والنيكل بمقادير ملائمة تؤدّي إلى تكوين فولاذ هدفيلد (Hadfield Steel) بوصفه طوراً رابطاً.

## الخلائط الثقيلة القائمة على التنغستين

بقيت الخلائط الثقيلة القائمة على التنغستين موضوع بحث مدة طويلة في كثير من المختبرات ومراكز البحث. لكن مشروعاً لدى معهد التقانة الأوروبي المركزي CEIT[15] هدف إلى استمثال الإنتاج الصناعي للمعادن الثقيلة W-Fe-Ni المعهودة التي تحتوي على نسبة من التنغستين بين 90 في المئة و97 في المئة (نسب وزنية)، وذلك بغية استخدامها في القذائف الخارقة بالطاقة الحركية (Kinetic Energy Penetrator).

دُرِست في المشروع كل مرحلة من سيرورة الإنتاج، من رصّ المسحوق حتى عملية التطريق النهائية للقطع المعالجة حرارياً، إضافة إلى أدائها الميداني. وتطلَّب البحث دراسات أساسية لإنضاج أوستفالد (Ostwald Ripening) في أثناء تلبيد الطَور السائل[16]. ودُرِست أيضاً ظاهرة التعتيق في أثناء المعالجات الحرارية بعد التلبيد[17]، ومفعول البنية الميكرويّة في مقاومة الشدّ وقابلية التشكيل والمتانة في الخلائط الثقيلة[18].

يجب أن تكون هذه المادة التي تحتوي عادة على 90 في المئة من حُبيْبات التنغستين الهش، قادرة على تحمّل عمليات تطريق بارد

ترفع مقاومتها للشدّ حتى 1000 ميغا باسكال. أما مطاوعتها فتتحقّق من خلال تحكُّم كيميائي وبنيوي ميكروي صارم يُعطي حُبيْبات تنغستين قريبة من الكروية، متضمَّنة في حاضنة مطاوعة تكعيبية ممركزة الوجه.

وقد تحقّقت زيادات ملحوظة في مقاومة الشدّ مقارنة بخليطة الأساس W-Ni-Fe غير المطرّقة، من خلال نثر جُسيْمات دقيقة من الرواسب $Ni_3(Al,Ti)$ في الحاضنة التكعيبية الممركزة الوجه، في حين أن نقصان الكثافة والمطاوعة المرافقتين أُبقي ضمن الحدود المقبولة[19][20].

## سيرورات إنتاج المساحيق

ازداد استخدام تقنيات تعدين المسحوق كثيراً في السنوات الأخيرة. ففي كثير من الحالات، يسمح تعدين المسحوق بإنتاج القطع المعدنية بتكاليف أقل وخواص أفضل. ومن مزايا تعدين المسحوق الأخرى أنه يمكن إنتاج خلائط وبنى ميكرويّة لا يمكن صنعها باستخدام طرائق التعدين الشائعة التي هي من قبيل السكب والتطريق. وأحد الجوانب المهمة في تعدين المسحوق هو إنتاج المسحوق المعدني المستخدم. فالطبيعة الفيزيائية والكيميائية للمسحوق الأولي سوف تحدِّد كثيراً من الخواص النهائية للقطع المنتجة بتعدين المسحوق.

والخلط الميكانيكي (Mechanical Alloying) (MA) هو طريقة لخلط المعادن من دون اللجوء إلى تسخين خارجي، أو معالجة كيميائية. ويمكن تحقيق هذا الخلط تقريباً بأي نوع من المطاحن(Mills)، أو الجرَّاشات (Grinders)، أو السحَّاقات (Attritors) التي تعتمد على الصدم المتكرر بأداة ما لتكسير المادة.

وطواحين الكرات هي أكثر الأنواع استخداماً لهذا الغرض. بتعبئة طاحونة دوارة بمساحيق عنصرية، وبعثرة المساحيق بوجود وسط قاس مثل الكرات الفولاذية أو السيراميكية المقسَّاة، تتولد ضغوط عالية جداً في نقاط التماس بين الوسط القاسي والمساحيق. وتكفي هذه الضغوط لدمج جُسيْمات المساحيق معاً على البارد لتكوين جُسيْمات أكبر. ومع نمو أحجام الجُسيْمات وفقدانها للمطاوعة بسبب التقسية بالانفعال، فإنها تتكسر وتعود جُسيْمات صغيرة. وتتكرر سيرورة الدمج والتكسير كثيراً من المرات حتى تمتزج العناصر الأولية بنعومة شديدة[21]. ويمكن إنتاج مسحوق شديد التجانس بهذه الطريقة عند درجة حرارة المحيط تقريباً.

يُنتج الخلط الميكانيكي مساحيق يمكن التحكُّم بمقاسات جُسيْماتها الوسطية وأشكالها وتوزُّعاتها وخصائصها الأخرى جزئياً في أثناء الخلط. وهذا النوع من الخلط مفيد لإنتاج خلائط عناصرها شديدة التفاعلية، أو شديدة الحساسية للسكب المعدني (خلط الصُهارة)، أو غير قابلة للتحضير بطرائق التركيب الكيميائي المباشر. إن كثيراً من المواد المتعدّدة المعادن تقع ضمن هذه الفئة، حيث يُستعمل الخلط الميكانيكي السهل والآمن نسبياً لإنتاج مساحيقها[23][22]. ويمكن استخدامه أيضاً للحصول على خواص غير عادية بسبب البنية الميكرويّة للحُبيْبات الناتجة الشديدة النعومة.

## الوضع الراهن للخلط الميكانيكي

يمكن إنتاج مساحيق بالخلط الميكانيكي لها أي تركيب تقريباً. لقد استُخدم الخلط الميكانيكي منذ ستينيات القرن العشرين لإنتاج خلائط فائقة، مقوّاة بجُسيْمات أكاسيد مبعثرة ذات مقاومة كبيرة

للزحف عند درجات الحرارة العالية. تُخلط المساحيق العنصرية ميكانيكياً للتخلص من كثير من صعوبات تحضيرها بتقنيات الدمج. من ناحية أخرى يمكن للخلائط الصلبة أن تُرجَع بسهولة وسرعة إلى مساحيق، وهذه خاصية مفيدة جداً لتطوير خلائط جديدة حينما تكون ثمة حاجة إلى كميات متواضعة من تراكيب خلط فريدة.

ويُستخدم الخلط الميكانيكي حالياً أيضاً في إنتاج خلائط كربيد التنغستين/الكوبالت (WC-Co). يُعطي طحن مزيج مسحوقَي كربيد التنغستين والكوبالت عادة مسحوقاً ذا جُسيْمات من كربيد التنغستين المطلية بالكوبالت. ويتحقّق هذا عادةً بالطحن بالكرات المنخفض الطاقة. صحيحٌ أن هذه الطريقة تخلط المادتين، إلا أنها لا تخلطهما خلطاً متجانساً وفق ما ذُكر آنفاً.

أُجريت كثير من البحوث في السنوات الأخيرة في مجال الخلط الميكانيكي. فعلى غرار المعالجة بالتصليد السريع (Rapid Solidification Processing) (RSP)، يمكن بواسطته إنتاج كثير من المواد اللامتوازنة الطَور، وتحقيق توسيع كبير لحدود قابلية الانحلال، وإنتاج بُنى ميكرويّة نانوية البلّورات. ويمكن بواسطته أيضاً تحويل المعادن القابلة للتفاعل إلى مساحيق، وهذا يلغي الحاجة إلى البوتقات وما ينجم عنها، وتحويل المادة الكتلية إلى مساحيق ناعمة. واستخدَم كثير من الباحثين الخلط الميكانيكي لإنتاج مركَّبات متعدّدة المعادن من مساحيق معادن عنصرية. وثمة لائحة طويلة من المركَّبات المختلفة التي صُنعت بنجاح بهذه الطريقة.

وتماماً على غرار المعالجة بالتصليد السريع، يمكن استخدام الخلط الميكانيكي لإنتاج بُنى ميكرويّة شديدة النعومة، وبنى غير بلّورية ذات مقاسات تقع في المجال النانومتري بسهولة. وثمة محاولات بحثية حالياً في كثير من المختبرات لاستغلال هذه البُنى

واكتشاف خواصها. من الواضح أن هذه المواد يمكن أن تحقِّق قدراً كبيراً من تقوية الحدود الحُبَيْبية، إلا أن إمكاناتها لم تُدرك إلا الآن. ثمة أيضاً مقدار كبير من العمل الذي يُظهر أنه يمكن تخفيض درجة حرارة التلبيد كثيراً بتصغير البنية الميكرويّة ومقاسات الجُسيْمات، باستخدام الخلط الميكانيكي. ويُنتِج الخلط الميكانيكي بُنى شديدة عدم الانتظام، ولذا تمتلك طاقة أعلى كثيراً مما تمتلكه المواد الطبيعية. وفي أثناء مرحلة التلبيد الأولى، تعزِّز هذه البنية تكوُّن ونمو أعناق الاندماج. أما مقاس الحُبيْبة الصغير فهو مفيد جداً لمرحلة التلبيد الثانية.

تُعرف المعالجة بالتصليد السريع بمقدرتها على إنتاج خلائط بتراكيز للمادة المحلولة أعلى كثيراً من حدود قابلية الانحلال عند وضع التوازن. كذلك يمكن للخلط الميكانيكي حل كميات كبيرة من العناصر ذات قابلية الانحلال المحدودة.

## المعالجة بقابلية انحلال الحالة الصلبة

لقد تحقّق زيادات في قابلية الانحلال في الحالة الصلبة (Solid Solubility) في عدد من الخلائط الثنائية القائمة على الألمنيوم والتيتانيوم والمغنيزيوم. ومقارنةً بطريقة التصليد السريع، فإن الخلط الميكانيكي يؤدّي عموماً إلى قابلية انحلال للحالة الصلبة أعلى. وفي بعض الحالات حصلت زيادة قابلية الانحلال بواسطة الخلط الميكانيكي لخلائط كالـ (Ti-Mg) لا يمكن للتصليد السريع أن يحققه فيها. وثمة قلة قليلة من المنشورات عن زيادة قابلية انحلال الحالة الصلبة في الأطوار الوسيطة. ويُظهر الجدول 6 ـ 2 زيادات قابلية الانحلال المتحقِّقة في كل من التقنيتين.

**الجدول 6 ـ 2: زيادات قابلية انحلال الحالة الصلبة بالتصليد السريع والخلط الميكانيكي.**

| المذيب | المذاب | قابلية الانحلال، في المئة | | |
|---|---|---|---|---|
| | | في حالة التوازن عند درجة حرارة الغرفة | في التصليد السريع | في الخلط الميكانيكي |
| Al | Fe | 0.025 | 4.3 | 4.5 |
| Al | Mg | 18.9 | 40 | 23 |
| Al | Nb | 0.065 | 2.4 | 25-30 |
| Al | Zr | 0.083 | 1.5 | 9.1 |
| Mg | Ni | ~0 | - | 3.8 |
| Mg | Ti | ~0 | - | 4.2 |
| Nb | Al | < 6 | 25 | 60 |
| Ni | Ag | ~0 | - | 9.0 |
| Ti | Al | < 11 | - | > 33 |
| Ti | Mg | < 0.02 | - | 3.6 |

## المعالجة البلازمية

استقصى عدد من الباحثين إمكان استخدام تقنيات المعالجة البلازمية لإنتاج مواد معدنية ومتعدّدة المعادن وسيراميكية ومركبة جُسيْماتها شديدة النعومة، وذلك بالتفاعل عند درجات الحرارة العالية والتبريد السريع[(24)(28)]. يمكن استخدام درجة الحرارة العالية والمحتوى الحراري المركَّز في أقواس البلازما الحرارية لتبخير معظم المواد، ويمكن لتدرّج الحرارة المتزايد أن يسمح بتنوِّي جُسيْمات بالغة الدقة بالتبريد السريع.

### توضيع الأبخرة فيزيائياً

يمكن اعتبار تقنية توضيع الأبخرة فيزيائياً آخر المطاف في سيرورة «التصليد السريع»، حيث تُقدَّر معدّلات التبريد بنحو $10^{13}$

كلفن/ثانية[29]. لقد استُخدم كل من التبخير بالحزمة الإلكترونية، وتوضيع الرذاذ لإنتاج أغشية خلائطية قائمة بذاتها، حيث رُصدت تنقية للحُبيْبات وزيادة في قابلية انحلال الحالة الصلبة والتزجُّج (Amorphization). ينزع مقاس الحُبيْبة عادة إلى أن يكون صغيراً جداً ضمن بضعة الميكرونات الأولى من الراسب المتوضِّع، واعتماداً على درجة حرارة الركيزة، يحصل نمو لنوع من الحُبيْبات القضبانية المتعامدة معها. وعندما تكون درجة حرارة الركيزة المعدنية أقل من $0.3T_m$ ($T_m$ هي درجة حرارة الانصهار بالكلفن)، تكون البنية القضبانية شديدة المسامية على شكل بُلَيْرة تفصل بينها فراغات. وعند درجة حرارة بين $0.3T_m$ و$0.45T_m$، تتألف البنية من حُبيْبات قضبانية شديدة التراصّ، وعند درجات حرارة أعلى تعود المادة إلى التبلور لتعطي بُنى ذات حُبيْبات متساوية الأطوال المحورية[30]. لذا، وبُغية الحصول على مساحيق ذات حُبيْبات شديدة النعومة، باستخدام توضيع البخار فيزيائياً، استُخدمت ركائز شديدة التبريد وأُزيل الراسب المتراكم على نحو متكرر[29][31].

توجد أكبر الزيادات في قابلية انحلال الحالة الصلبة عموماً في تلك النظم التي تكون فيها قابلية انحلال الحالة الصلبة في حالة التوازن منخفضة. لذا، لم تُشاهد زيادات في قابلية الانحلال في المواد الناتجة من التبريد السريع للبخار في حالة الـ Ti-Al، والـ Mg-Y، على سبيل المثال، اللتين تتصفان بقابلية انحلال عالية في حالة التوازن. أما الخليطتان Al-Cu وAl-Mn، فتتصفان بقابلية انحلال معتدلة في حالة التوازن، ولذا أبدت بعض الزيادة في قابلية الانحلال في المادة الناتجة من تبريد البخار. وأبدت الـ Al-Cr وTi-Mg وMg-Ti التي تتصف بقابلية انحلال منخفضة جداً في حالة التوازن، زيادات كبيرة جداً في قابلية انحلال الحالة الصلبة. أما الـ Al-Fe، فهي الخليطة الوحيدة التي

لا تخضع لهذه القاعدة، فقد كانت القيمة العظمى لقابلية انحلال الحالة الصلبة للمادة الناتجة عن تبريد البخار 5 في المئة فقط، برغم أن قابلية الانحلال في حالة التوازن تقل عن 0.1 في المئة.

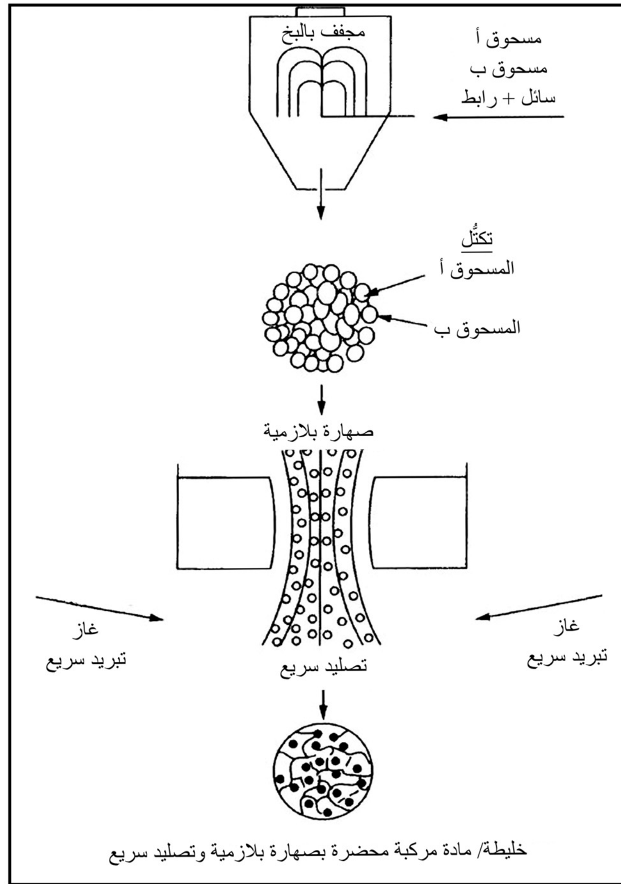
### سيرورة بلازمية جديدة

طوَّرت الشركة GTE Products Corp. سيرورة جديدة للصهر البلازمي والتصليد السريع، وذلك لاستخدامها في إنتاج مساحيق خلائط سريعة التصليد، تقوم على عدد من المعادن والخلائط، أو على تراكيب مختلفة من المعادن والسيراميكات[32]. إن مقاس جُسيْم المسحوق الناتج هنا يساوي، أو يقل، عن ذاك الذي يتحقَّق في المساحيق المعدنية التي تُذرّر بالغاز أو الماء. لذا طورت الشركة المذكورة مرحلة إضافية تتضمّن تذريراً ميكروياً لسد الحاجة إلى مساحيق شديدة النعومة[32].

وفي شكل مبسط من السيرورة مبيّن في الشكل 6 ـ 6، تُصهر المساحيق المعدنية ضمن بلازما عالية الحرارة، ثم يُصلَّد الرذاذ الناتج العالي السرعة تصليداً سريعاً بالسقوط الحر ضمن غاز خامل، أو بالتبريد بأرغون أو نيتروجين سائل، أو بالصدم بركيزة متحركة شديدة البرودة.

### الصهر البلازمي

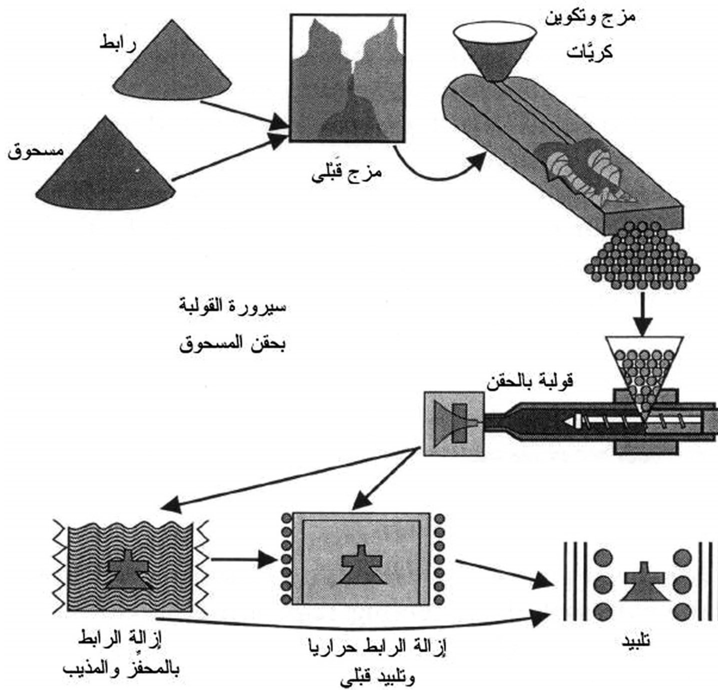
تتضمّن الخطوة الأولى من هذه السيرورة إدخال مسحوق خشن، مقاس حُبيْباته من رتبة 45 ميكرون، في لهب بلازما، حيث تُحمل التكتلات على غاز حامل (أرغون أو هيليوم أو نيتروجين، وفي بعض الأحيان هيدروجين للتنقية الكيميائية)، وتُدخل ضمن البلازما، بحيث يحصل الانصهار والتصليد من دون حدوث تماس في ما بين الجُسيْمات. فتنتج من الصهر البلازمي جُسيْمات كروية وكثيفة وذات خواص تدفّق وتعبئة ممتازة.




**الشكل 6 ـ 5: سيرورة تحضير المسحوق بالصُهارة البلازمية والتصليد السريع التي طورَّتها الشركة GTE**(32).

وفي الواقع، إذا كانت المادة الأولية مؤلفة من أكثر من نوع واحد من الجُسيْمات، أو من أكثر من نوع واحد من المعدن أو السيراميك، أو من أي تركيب منها، فإن المواد سوف تتفاعل أو تختلط في أثناء الانصهار لتكوِّن مسحوقاً خلائطياً مركَّباً. على سبيل

المثال، أُنتِج المسحوق المركَّب ألمنيوم ـ بوريد التيتانيوم بطريقة صُهارة البلازما والتصليد السريع، حيث توضع الـ $TiB_2$ ضمن الجسيم، وتوضع الألمنيوم في خارجه. لم يكن من الممكن إنتاج المادة المركَّبة الجديدة بتقنيات التصنيع المعهودة. وثمة مثال آخر هو المنظومة WC-Co، التي تتكوّن فيها البنية الميكرويّة للمسحوق المتكتل المجفف بالبخ بعد تصنيعه بتلك السيرورة، من جُسيْمات WC، وحاضنة Co-W-C، وقليل من الكوبالت المترسِّب.




**الشكل 6 ـ 6: سيرورة القولبة بحقن المسحوق.**

يمكن تغيير ظروف البلازما لضبط تدفّق وقطر تيار الغاز، ويمكن تغيير سرعة الغاز من سرعة من دون صوتية (800 قدم/ ثانية) حتى 2 ماك. ويمكن التحكُّم باللحظة التي يُحقن فيها المسحوق، لأنها مهمة أيضاً. أما درجة الحرارة التي يكتسبها المسحوق، فتتأثر بقطر تكتله، وبمدة بقائه ضمن البلازما، وبدرجات حرارة اللهب التي تتعرض لها الجُسيْمات.

وفي عملية الانصهار، تُسرَّع الجُسيْمات حتى سرعة غاز البلازما تقريباً. وتُجمع الجُسيْمات المصلَّدة في حجرة مبردة ضمن بيئة خاملة أو مخلاَّة جزئياً. وتحصل معدّلات تبريد عالية جداً بعد الانصهار بالبلازما بسبب سرعة القطيرات العالية ومقاساتها الصغيرة. ويمكن تحقيق مزيد من التبريد بنفثات غاز مصممة لتصطدم بالقطيرات المنصهرة حين خروجها من لهب البلازما. تجدر الإشارة إلى أن أقطار الجُسيْمات هنا أصغر، وسرعاتها أكبر، من تلك الناتجة في التذرير بالغاز التي تتحقّق فيها معدّلات تبريد تساوي $10^6$ ـ $10^4$ مْ/ ثا.

## التكوير بانفراغ البلازما

التكوير بانفراغ البلازما (Plasma Discharge Spheroidization) (PDS) هو تقنية تُنتِج مساحيق شديدة النعومة ضمن غاز خامل شديد التبريد بالصهر البلازمي الموضعي بالتردّدات الراديوية لشحنة مخلوطة من قبل. مقارنةً بتقنيات معالجة المساحيق الشائعة، تُنتج هذه السيرورة مساحيق مخلوطة، أقطار جُسيْماتها تساوي 10 ـ 1 ميكرون، ويمكن التحكُّم بتوزُّعات تلك المقاسات تحكُّماً دقيقاً. وتتصف هذه المساحيق الشديدة النعومة بقابلية فائقة للتلبيد، وبخواص ميكانيكية جيدة في الحالة المكثَّفة مقارنةً بالمساحيق التجارية.

إن محتوى هذه المساحيق الشديدة النعومة من الأُكسجين أعلى من ذاك الذي في المساحيق الخشنة بسبب مساحتها السطحية الكبيرة.

وفي ما يخص مسحوق الـ NiAl الشديد النعومة، ذا الجُسيْمات غير المنتظمة الشكل التي تعبُر من خلال منخل يحتوي على 325 ثقباً في الإنش المربع (أي قياس جُسيْماته يقل عن 44 ميكرون)، والملبّد عند 1600 مْ مدة ساعة، فإنه يمكن تكثيفه حتى نحو 96 في المئة من الكثافة النظرية، مقارنةً بنحو 82 في المئة للمساحيق الخشنة. والخواص الميكانيكية للمواد المرصوصة بالكبس الحراري للمساحيق الشديدة النعومة تفوق أيضاً تلك التي للمساحيق الخشنة، مع مقاومتي خضوع وشد أكبر.

يمكن استخدام المساحيق الشديدة التلبيد في تطبيقات تعدين المسحوق حتى الشكل النهائي أو القريب من النهائي، خصوصاً في القولبة بالحقن. وقد طُوِّرت هذه التقانة برعاية من مختبرات بحوث الجيش الأميركي، وكان معدّل إنتاج مسحوقَي التيتانيوم بيتا وألمينيد التيتانيوم الشديدي النعومة بهذه الطريقة أعلى من 50 كغ/اليوم.

## الرص بالبخ

أُنتجت خلائط جديدة قائمة على الألمنيوم بالرص بالبخ (Spray Compaction). بسبب معدّلات التبريد العالية جداً المتحققّة في أثناء البخ والتصليد، يمكن زيادة مستوى العناصر التي في قيد الخلط إلى ما فوق حالة التوازن. وقد تم تحقيق نسبة وزنية من السليكون تساوي 35 في المئة، أدت إلى مقاومة اهتراء ممتازة، ومُعَامل تمدّد حراري صغير جداً. يُضاف إلى ذلك أن إنتاج الخلائط المقوّاة ببعثرة الجُسيْمات ممكن بهذه الطريقة، وأن مجموعة تقنيات الخلط هذه، إضافة إلى خواص المواد الناتجة، تفتح الباب إلى مجالات جديدة من تطبيقات خلائط الألمنيوم. على سبيل المثال، سوف يُستعاض في صناعة السيارات عن حديد الصبّ الرمادي، وهو المادة الشائعة لصنع

مكوّنات أساسية في المحرّك من قبيل بطائن الأسطوانات، بالألمنيوم.

صحيحٌ أنه قد جرى تطوير مبادئ الرصّ بالبخ قبل نحو 25 عاماً، إلا أن تطبيق هذه التقنية على خلائط الألمنيوم ما زال يحتاج إلى خبرة عالية، مع الأخذ في الحسبان شروط الأمان القاسية. وتجدر الإشارة إلى أنه لا يوجد في كافة أنحاء العالم سوى معمَلين من هذا النوع لرص خلائط الألمنيوم بالبخ.

## سيرورات مبتكرة أخرى لتعدين المسحوق

### الرص الدافئ

تُنتِج طريقة الرصّ الدافئ (Warm Compaction)، التي تَستخدم أدوات مسخنة ومساحيق معيّنة في أثناء الرصّ الوحيد الخطوة[33]، قِطعاً معدنية عالية الكثافة. وعملياً، تُلغي هذه الطريقة خطوات المعالجة المعتادة، مع تحقيق الخواص المطلوبة للمنتج النهائي.

كان تطوير سيرورة الشركة أنكوردِنس (Ancordense Process)، المعروفة أيضاً بالكبس الدافئ أو الرصّ الدافئ، خطوة كبيرة في مجال تعدين المسحوق. إنه لمن المعروف في الصناعة أن خواص القطع المصنوعة بتعدين المسحوق تتحسن كثيراً مع زيادة الكثافة. وهذا صحيح على وجه الخصوص بالنسبة إلى الخواص الديناميكية، ومنها مقاومة الصدم ومقاومة التعب. لذا كانت ثمة محاولات مضنية عبر السنين لزيادة قابلية مساحيق الحديد للكبس، نجمت عنها زيادة في كثافة قطع عالية الكثافة من 6.7 ميغا غرام/ م$^3$ قبل نحو 15 سنة حتى 7.1 ـ 7.0 ميغا غرام/ م$^3$ اليوم. وبغية الحصول على كثافات أعلى، كان من الضروري إما استخدام ضغوط كبس عالية لا يمكن تحقيقها بسبب تكاليف الأدوات غير المقبولة، أو استخدام سيرورة

الكبس المضاعف والتلبيد المضاعف، العاليتَي التكاليف.

إن التكاليف النسبية لتقنيات الكثافة العالية، مقارنةً بتقانة الكبس والتلبيد المفردين، تزيد بنحو 40 في المئة للتسريب، و60 في المئة للكبس والتلبيد المضاعفين، 100 في المئة لتطريق المسحوق. وقد حدَّت هذه التكاليف العالية من توسُّع تعدين المسحوق إلى التطبيقات ذات الإجهادات العالية الواسعة الانتشار في صناعة السيارات التي تمثل أكبر سوق لها.

أما سيرورة الكبس الدافئ، فتستخدم مفهوماً على درجة من البساطة المدهشة، هو كبس المسحوق عند درجة حرارة مرتفعة نسبياً لتكوين القطعة الطرية (Green Part). وقد ورد في المنشورات أنه قد جرى استخدام درجة حرارة تساوي 143 مْ لتحقيق زيادات في الكثافة تساوي نحو 0.14– 0.08 ميغا غرام/ سم$^3$. وورد في المنشورات أيضاً أنه قد لوحظ ازدياد خطي في الكثافة حتى درجات حرارة تتجاوز 200 مْ.

ويُدَّعى أن تكلفة الكبس الدافئ أعلى بـ 30 ـ 20 في المئة فقط من تكلفة المعالجة المعتادة، في حين أن الخواص الناتجة تكافئ تلك التي تنتج من الكبس والتلبيد المضاعفين اللذين تزيد تكلفتهما بـ 60 في المئة على تكلفة المعالجة المعتادة. وإضافةً إلى الكثافة العالية التي يمكن أن تصل بالكبس الدافئ حتى 7.4 ميغا غرام/ سم$^3$ (من الضروري أن نشير إلى أن هذا يتحقّق عند ضغط رصّ يساوي 770 ميغا باسكال)، يُدَّعى أن مقاومة الشدّ في الحالة الغضة (Green Strength) في القطع ازدادت حتى 31 ـ 17 ميغا نيوتن/ م$^2$، وهذه زيادة تساوي 80 في المئة على الأقل من تلك الناتجة بالمعالجة العادية عند الكثافة نفسها، وتساوي أكثر من ضعفها عند ضغط الرصّ نفسه. ويُدَّعى أيضاً أنه يمكن تشغيل المادة وهي طرية، وهذا ما يؤدّي إلى مزايا إضافية. أكثر من ذلك، وعلى نحو عجيب، كانت قوى اللفظ اللازمة عند ضغط رصّ معيّن أخفض عملياً من تلك التي

في التقنيات المعهودة، غالباً بنحو 50 في المئة، وهذا ما يؤدّي إلى زيادة عمر الأدوات، وفق قول جيرمان (German) ودونالدسون (Donaldson) وجونسون (Johnson).

### التشكيل البارد

في تقانة التشكيل البارد (Cold Forming) الجديدة، تُطلى الجُسيْمات (المعدنية أو المتعدّدة المعادن أو السيراميكية) إلكترونياً بغية التحكّم بتركيب المادة في مستوى الجُسيْم، وتكوين القطعة النهائية بخواص متجانسة. يَحقن ملقمٌ بالضغط المساحيق في قالب الكبس، مؤدياً إلى تعبئة متجانسة. وبحقن محلول تفعيل مع جُسيْمات مطلية معتادة أو مهندَسة لهذا الغرض من قبيل الألمنيوم ـ نحاس، أو التنغستين والكوبالت المطلي بالنحاس، أو النيكل ـ ألمنيوم، أو النيكل ـ فولاذ عديم الصدأ، أو النيكل ـ تيتانيوم، قبل الكبس، تُزال الأكاسيد السطحية ويتحسَّن اللحام البارد. يمكن استخدام هذه السيرورة المكوَّنة من خطوة واحدة لكبس معظم القطع حتى كثافة 100 في المئة عند درجة حرارة الجو المحيط، والقطع التي تحتاج عادة إلى تلبيد تُبدي كثافة أعلى وتصدّعات أقل ومقاومة شدّ أكبر.

### رص مغنطيسي ديناميكي

في سيرورة الرصّ المغنطيسي الديناميكي (Dynamic Magnetic Compaction)، تُستخدم ضغوط مغنطيسية نبضية سريعة جداً لرصّ قطع سيارات معقّدة عالية الكثافة وتحتوي على معادن وخلائط وسيراميكات ومواد مركَّبة.

### التصنيع والمعالجة بالليزر

سلَّط برنامج ذو أهمية خاصة الضوء على التصنيع والمعالجة باستعمال الليزر (Laser Manufacturing/ Processing) بغرض الإعداد

السريع للنماذج الأولية، حيث يمكن تقصير فترات تطوير القطع المطلوبة إلى حد كبير جداً. على سبيل المثال، يمكن استخدام البيانات التي يُعِدُّها المصمم بمساعدة برنامج حاسوبي لبرمجة حركة آلة الليزر وصنع القطعة مباشرة. وقد صُمِّم البرنامج المذكور لتحريك منصة الليزر في المستوي لبناء القطعة طبقة تلو أخرى.

يوفِّر بناء الطبقات ليزرياً إمكان صنع مكوِّنات معدنية كثافتها تساوي 100 في المئة. ووفقاً لقول مازوندر (Mazunder) والعاملين معه[34]، تمكِّن محطات عمل، خماسية المحاور متحكَّم بها حاسوبياً ومتكاملة مع ليزرات، من صنع قطع ذات أشكال هندسية مختلفة. وقد بيَّنت الأعمال الأولية أنه يمكن صنع مكوّنات ذات خواص ميكانيكية مشابهة لتلك التي تصنع من مواد صفيحية، وحتى من مشكِّلات الأكاسيد كالألمنيوم والنحاس والنيكل والخلائط الحديدية، ومنها الخليطة H13. وقد حققت الطريقة توضيعاً حجمياً للألمنيوم بمقدار 4.1 سم$^3$/ دقيقة عند سرعة عرضانية للمنصة تساوي 42.3 مم/ ثا. وكانت نسب استخدام المساحيق بين 30 و90 في المئة، بناءً على عرض الطبقة التي يجري توضيعها (كلما كان العرض أكبر كانت نسبة الاستخدام أعلى). وكانت خشونة السطح المتوضعة مشابهة لتلك الناجمة عن البُنى المصبوبة. أما أفضل دقة لسماكة الجدران أمكن الحصول عليها باستخدام ليزر غاز ثاني أُكسيد الكربون الذي تبلغ قدرته 6 كيلو واط، فتساوي نحو 0.5 مم.

وثمة سيرورة جديدة في قيد التطوير لصنع قطع معدنية شبه نهائية الشكل، تُنتِج مكوّنات معدنية تامة الكثافة، بدمج مساحيق معدنية معاً وهي في محرق حزمة ليزرية، بخطوة واحدة، حيث يجري تكوين القطعة بتوضيع الطبقات واحدة تلو أخرى. يقول لويس

(Lewis) ورفاقه[35] إن هذه السيرورة تتضمّن تكامل تقنية تدفّق المسحوق، والتصليد المعدني، والتقانة الليزرية، وتحليل انسياب الحرارة، وتقانتي التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب، والتحكُّم والتشخيص. وقد عولجت بتقانة الليزر خلائط ألمنيوم، والسلسلتين 300 و400 من الفولاذ غير القابل للصدأ، وخلائط الحديد والنيكل، وخلائط التيتانيوم، والتنغستين والنيكل ـ ألمنيوم وثنائي سيليسيد الموليبدن، وفولاذات الأدوات.

وطوَّر إريك ويتني (Eric Whitney) وزملاؤه[36] نظاماً للإعداد السريع لنماذج أولية شبه نهائية لمكوّنات إنشائية عالية الأمان من التيتانيوم وخلائطه من دون استخدام قوالب حقن أو كبس. توضع مادة أولية من مسحوق ناعم من التيتانيوم المغربل، أو مسحوق تيتانيوم ناعم مخلوط بمسحوق خليطة رئيسة Al-Va ضمن فرشة من مسحوق مميَّع بالأرغون تحت ليزر ثاني أُكسيد الكربون العالي القدرة. تُحرَّك حزمة الليزر التي قدرتها تساوي 14 كيلو واط، على مسار يمثل شريحة واحدة من مقطع عرضاني للقطعة الصلبة المطلوبة، فتجعل خليطة التيتانيوم تندمج وفق شكل تلك الشريحة، ويُضاف مزيد من المسحوق إلى سطح القطعة الصلبة بتمييع فرشة المسحوق. لقد صُنعت بهذه الطريقة قضبان تيتانيوم عالية الكثافة وأسطوانات سماكة جدرانها تساوي 2.54 سم. وبيَّنت قياسات توصيف المادة تلوّثاً أصغرياً في العملية، إضافة إلى مقاومات ميكانيكية تتجاوز تلك التي تُحدِّدها المقاييس ASTM للـ C-2 Ti.

## سيرورات لصنع القِطَع

يتضمّن تعدين المسحوق ضغطاً أولياً لمسحوق المعدن، وتتبعه

سيرورة التلبيد بالمعالجة الحرارية. وتكون درجة حرارة التلبيد عادةً أدنى من درجة حرارة انصهار المكوِّن المعدني الرئيس. وفي الإنتاج الكمي، يُنفَّذ التلبيد عموماً في أفران متواصلة العمل. لكن من أجل مرونة أكبر، تميل الشركات التجارية التي تقوم بالمعالجة الحرارية إلى إزالة الرابط والتلبيد في أفران تعمل على دفعات عند ضغوط طبيعية أو عالية[37].

تنمو جُسيْمات المسحوق الإفرادية معاً في أثناء التلبيد بالتغلغل لتكوين مادة متعدّدة البلّورات، تعطي القطعة المضغوطة الاستقرار المطلوب. ويُلبَّد الفولاذ المصنَّع بطريقة تعدين المسحوق عند درجة حرارة بين 1100 و1250 مْ، في حين أن المعادن غير الحديدية، من قبيل البرونز والشَبَه والألمنيوم، تُلبَّد عند درجات حرارة أدنى كثيراً.

ويسمّى التلبيد عند درجة حرارة أعلى من درجة الانصهار بتلبيد الطَور السائل. ومن أجل أنواع معيّنة من الفولاذ (فولاذ السرعة العالية تحديداً)، يبقى الطَور السائل مستقراً مدة معيّنة، وهذا ما يجعل التحكّم الدقيق بدرجة الحرارة ضرورياً، لأنه يؤدّي إلى إعادة ترتيب البنية، وإلى مزيد من ضغطها. إنه لمن المهم في أثناء تلبيد الطَور السائل درء تشوّه القطع المكبوسة بسبب التقلص الشديد.

انظر المراجع 3، 37، 38، 39، 40، 41 للاطلاع على تفاصيل إزالة الرابط والتلبيد عند درجات حرارة تصل إلى 750 مْ، والتلبيد الوقائي تحت التخلية عند درجات تصل حتى 1100، 1200، 1600، 3000 مْ، إضافة إلى التلبيد تحت الضغط عند 2200 مْ، والتلبيد بالأمواج الميكرويّة[40][41]، وإزالة الرابط والتلبيد المحفَّزين كيميائياً للقطع المقولبة بحقن المعدن (ثمة المزيد لاحقاً عن الموضوع في هذا الفصل).

## سيرورات إنتاج متخصصة: القولبة بحقن المسحوق

قد يتذكَّر البعض الشكل الأصلي لأقواس تقويم الأسنان المصنوعة من أربطة ملحومة تُزلَق فوق الأسنان فرادى. لقد أعطت تلك الأقواس التي استمرت في الاستخدام حتى أوائل سبعينيات القرن العشرين، معنى حقيقياً لعبارة «الفم المعدني». إلا أن القولبة بحقن المسحوق (Powder-Injection-Molding) (PIM)، إضافة إلى اللواصق الجديدة، أعطت أطباء الأسنان أقواساً أصغر حجماً وأفضل منظراً أيضاً. وحلّت تصاميم القطعة الواحدة المدعومة بهيكل مثقب لتعزيز اللصق محل تصاميم القطعتين ذات الشبكة الخلفية الملحومة. يُنتَج الآن أكثر من 100 000 قوس كل يوم بتقانة القولبة بحقن المسحوق، بتكلفة إنتاج تصل حتى 15 مليون دولار سنوياً. وهذا مجرد مثال واحد لمكوّنات صغيرة معقّدة تُنتَج في الصناعة الطبية.

وتُركِّز التطورات الأخيرة الاهتمام بأجهزة تُستخدَم في تنفيذ إجراءات التنظير الطبي الباطني والجراحة التنظيرية. لذا على المهندسين إيجاد سبل الحفاظ على الدقة مع زيادة القوة ومقاومة الاهتراء والمقاومة الكيميائية والتوافق الحيوي. والقولبة بحقن المسحوق تعطيهم المقدرة على تشكيل قطع معقّدة ذات سماحيات دقيقة من مواد لا تتصف عادة بسهولة المعالجة التي تمتلكها المواد الحرارية التلدّن التي تُقولَب بالحقن. يضاف إلى ذلك أن هذه التقانة أعادت إلى المعادن والسيراميكات مكانتها[42].

### ما هي القولبة بحقن المسحوق؟

ليست القولبة بحقن المسحوق تقانة جديدة، إلا أنها لم تلقَ اهتماماً تجارياً واسعاً حتى ثمانينيات القرن العشرين. ومن التطوّرات

الأخيرة في هذا المجال خامات أولية متقدمة مضبوطة التقلُّص، وتجهيزات معالجة من آخر ما تُوصل إليه تتحكّم بدقة بعمليات القولبة والتلبيد وإزالة الرابط.

طُوِّرت القولبة بحقن المسحوق أولاً في عشرينيات القرن العشرين، واستُخدمت لقولبة الأجسام السيراميكية المستخدمة في شمعات الإشعال (Spark Plugs). وشهدت في خمسينيات القرن العشرين استخداماً محدوداً في تشكيل المكوِّنات الكربيدية والسيراميكية باستخدام لواصق الإيبوكسي والشمع والسللوز. وازداد الاهتمام بها في عام 1979، حينما حاز تطبيقان في الصناعة الجوية الفضائية جائزتي التصميم: مانع تسرّب لبرغي في طائرة نفاثة تجارية، وحجرة احتراق وحاقن لمحرّك صاروخي ذي وقود دافع سائل.

تبدأ القولبة بحقن المسحوق بمواد مسحوقة ناعمة تتألف من جُسيْمات كروية تقريباً تتراوح أقطارها بين 0.1 و 20 ميكروناً. ولتحضير هذه المواد بغية إدخالها إلى آلة القولبة بالحقن، تُخلط المساحيق وتُضاف إليها مواد رابطة عادية من الشموع والراتنجات الحرارية التلدُّن. وقد وفّرت التطوّرات الأخيرة للمهندسين مزيداً من الخيارات، منها نظم ربط تقوم على البولي أسيتالات (Polyacetals) والبولي سكريد (Polysaccharides).

دور الرابط في هذه السيرورة هو تزليق مزيج المسحوق بحيث يتدفّق بسهولة خلال فجوات القالب. ويملأ الرابط أيضاً الفراغات بين جُسيْمات المعدن أو السيراميك، ويحقِّق للأشكال المقولبة حماية بحيث يمكن تداولها في أثناء المعالجة، وتمثل الروابط البوليمرية ما يصل إلى 40 في المئة من حجم المزيج. وفي الخطوة الأخيرة من العملية يُصلَّد المزيج ويقطَّع إلى أقراص سهلة التداول مشابهة لخامات اللّدائن.

وبعد أن يحضِّر المصنِّعون راتنجاتهم بأنفسهم، أو يشترونها محضرة من السوق، يُشكِّلون القطع عند درجات حرارة وضغوط منخفضة نسبياً باستخدام تجهيزات قولبة اللّدائن بالحقن المعروفة. وتتراوح درجة حرارة القولبة بين 150 و260 مْ، وهذه حرارة تُطرِّي المواد الرابطة لتصبح عجينية التماسك، فتتغلغل عبر فجوات القالب.

عندما تبرد القطع تذهب إلى سيرورة إزالة الرابط باستخدام الحرارة أو المواد الكيميائية، أو حتى الماء حيث يحصل التخلّص من معظم الرابط. في عملية إزالة الرابط حرارياً، تضخ أفران منخفضة الحرارة، متحكَّم بها إلكترونياً كأفران الحمل الحراري، الهواء فوق القطع، فيجمع تكاثفات الرابط الذي يبقى منه جزء صغير يسمح للعمال بنقل القطع إلى التلبيد من دون إيذائها. أما الطرائق الكيمائية فترشح الرابط من خلال سيرورة تحفيز كيميائية (انظر الشكل 6 ـ 6).

ويربط التلبيد، في الخطوة التالية، الجُسيْمات معاً في المستوى عبر انتشار الذرّات عند درجات حرارة تقارب 85 في المئة من درجة حرارة الانصهار. ويزيل التلبيد الفراغات التي تخلِّفها المواد الرابطة، وهذا ما يزيد كثافة القطعة ويقلِّص حجمها. إلا أن التقلُّص يكون متجانساً ومتناحياً، وهذا ما يسمح للمهندسين بتصميم قوالب بمقاسات أكبر بنحو 20 في المئة من الأبعاد النهائية المطلوبة للقطعة. ويمنع تلبيد القطع المعدنية في جو مسيطر عليه، أو في الخلاء، تأكسدها. وفي طريقة أخرى تُستخدم خطوة واحدة لإزالة الرابط والتلبيد، وذلك في الفرن نفسه. وهذا يوفّر مزيداً من حماية السطوح من الأكسدة لأن القطع لا تُتداول بين الخطوات، وهذا ما يؤدّي إلى إنهاء محسَّن للسطوح، وفق ما يقوله المنتجون.

وتصل كثافة القطع الملبّدة عادة حتى 96 في المئة من الكثافة النظرية، مع خواص تقترب من خواص المادة المطرّقة. وترتفع

الكثافة على نحو أشدّ باستخدام طرائق التشويه البارد والساخن التي هي من قبيل الكبس الحار المتساوي الضغط.

صحيحٌ أن القولبة بالحقن تقترن عادة بحجم إنتاج عالٍ، إلا أن القولبة بحقن المسحوق تُعتبر اقتصادية عند معدّلات الإنتاج العالية والمنخفضة، التي تختلف من مقدار كبير يصل حتى 000 100 قطعة في اليوم، حتى مقدار ضئيل يساوي 5000 قطعة في السنة. ومن الناحية الإنتاجية، تلغي القولبة بحقن المسحوق عمليات كالجلخ والتشغيل والتثقيب والتجويف. ويقتصد المصنِّعون المال أيضاً بإعادة استخدام بقايا ومخلفات التشكيل والقطع التالفة، أي إنهم يستعملون المواد بمعدل يساوي 100 في المئة تقريباً.

صحيحٌ أن القولبة بحقن المسحوق تصلح تقريباً لأي شكل يمكن تكوينه بقولبة حقن اللّدائن، إلا أن ثمة مثالب ومحدوديات فيها. على سبيل المثال، لا تستطيع هذه السيرورة منافَسة الخراطة المؤتمتة (Screw Machining)، أو في سك الأشكال البسيطة المتناظرة محورياً. وتكاليف المواد والأدوات وتجهيزات المعالجة تحد من أحجام القطع. والمصنِّعون يضعون حدوداً على سماكات القطع بين 10 و50 مم، لأن زيادة السماكة تُطيل خطوة إزالة الرابط.

إن أفضل التطبيقات للقولبة بحقن المسحوق هي المكوّنات المعقّدة حيث تكون هذه السيرورة منافسة لطرائق التشكيل الأخرى، ومنها الصبّ بالشمع المهدور (Investment Casting) والتشغيل.

## اعتبارات التصميم والمواد

تُنتِج القولبة بحقن المسحوق مكوّنات معقّدة نهائية الشكل من المعادن والسيراميكات والكربيدات المتلاصقة والمواد السيراميكية المعدنية. وتمثل تكاليف القولبة بحقن المسحوق إلى حد بعيد انعكاساً لحجم القطعة، وتكلفة الأدوات وتعقيدها، ومدة القولبة،

وسرعتَي إزالة الرابط والتلبيد، إضافة إلى عوامل أخرى مباشرة نسبياً. يمكن تحقيق كثير من الأشكال بالقولبة بحقن المسحوق، إلا أن ثمة جوانب معيّنة تؤثّر كثيراً في سهولة المعالجة، وفي الإنتاجية والتكاليف. فكيف تعرف إن كانت القولبة بحقن المسحوق ملائمة لتطبيق معيّن؟ إن مخطّطاً لشجرة قرار بسيطة يمكن أن تُجيب عن هذا السؤال.

ثم يأتي دور المواد. يجب أن تكون مواد القولبة بحقن المسحوق مساحيق ذات حُبيْبات صغيرة الحجم تتلبّد بكثافة من دون الحاجة إلى دورات معالجة استثنائية. وفي حالة السيراميكات، هذا يتطلب عادة إضافة محسِّنات للتلبيد. وفي حالة المعادن، يفضَّل تجنّب استخدام المعادن المشكِّلة للأكاسيد والقابلة للتفاعل والمتطايرة والسامة، ومنها البيريليوم والزئبق والرصاص والمغنيزيوم. ويفضّل استخدام القولبة بحقن المسحوق للمواد التي تزيد درجة حرارة انصهارها على 1000 مْ. أما في ما يخص المواد التي تقل درجة انصهارها عن ذلك، فالأصلح غالباً هو استخدام القولبة بالصبّ. إن أكثر المواد استخداماً في القولبة بحقن المسحوق هي الفولاذ العديم الصدأ وفولاذ الأدوات، والـ $Al_2O_3$، $ZrO_2$، وخلائط التيتانيوم، والخلائط الفائقة القائمة على النيكل والكوبالت.

إن التصاميم التي تحقّق تلك المعايير التي تخص الشكل والمواد هي المرشحة للقولبة بحقن المسحوق، حيث تصبح التكلفة في المقام الثاني. يمكن للمساحيق ذات الحُبيْبات الصغيرة الحجم أن تكون مرتفعة الثمن، لذا فإن المواد الجيدة المرشحة للقولبة بحقن المسحوق هي تلك التي تكون فيها تكاليف تشغيل وتصنيع المكوّنات أعلى من تكاليف المواد نفسها. في التصنيع بالقولبة بحقن المسحوق، تمثل تكاليف المواد نحو 15 في المئة من تكاليف التصنيع الكلية.

إن المواد القاسية صعبة ومُكلفة للسحق والتشغيل. لذا فإن أكثر التطبيقات استفادة من القولبة بحقن المسحوق هي تلك ذات المواد الصعبة التشغيل (فولاذ الأدوات والفولاذ العديم الصدأ والتيتانيوم والسيراميكات)، أو ذات الأشكال الهندسية المعقّدة.

من العوامل الأخرى ذات الصلة باختيار القولبة بحقن المسحوق، السماحيات والإنهاء السطحي. في ما يخص السطوح الخشنة، تُعتبر إقامة مرفق العمل هي العامل الرئيس في التكلفة. أما في حالة السطوح الناعمة، فتصبح فترات التشغيل طويلة، ومن ثمَّ تكون هي المهيمنة على التكلفة. لذا ثمة مجال من نعومة السطح تقع بين 4 و5 ميكرون، تكون فيها القولبة بحقن المسحوق هي المفضَّلة.

ثمة عشرة مبرِّرات تصميمية لاستخدام القولبة بحقن المسحوق، يمكن أن تتضح من بضعة اعتبارات مفتاحية. تلك العوامل هي:

- نسبة كتلة/حجم منخفضة.
- كمية تزيد على 5000 قطعة/السنة، ويفضل أن تكون أكبر من 20 000 قطعة في السنة.
- مواد صعبة التشغيل.
- تعقيد متوسط حتى تعقيد شديد.
- متطلبات أداء قاسية.
- مواصفات خاصة للإنهاء السطحي.
- تشكيلات صعبة من السماحيات.
- تصليد القطع المجمَّعة.
- مواضع غير حرجة لوشوم القطعة، ومنها علامات البوابات ودبوس اللفظ.
- تراكيب جديدة أو تشكيلات جديدة للتراكيب.

## المواد والتوجهات

تُستخدم القولبة بحقن المسحوق لكل من المعادن والسيراميكات (انظر الجدول 6 ـ 3). من التطبيقات الطبية لهذه الطريقة أدوات الجراحة، وعتاديات تثبيت لحواضن الأطفال الرضَّع ومقابض وأساور الأجهزة الجراحية، والشفرات.

**الجدول 6 ـ 3**: خواص مواد شائعة الاستخدام في القولبة بحقن المسحوق.

| الخاصية | فولاذ 4 –17 PH (ظرف H 900) | فولاذ 315L (أثناء التلبيد) | Fe-2%Ni (معالج حرارياً) | Fe-8%Ni (معالج حرارياً) |
|---|---|---|---|---|
| مقاومة الخضوع (ميغا باسكال) | 1100 ـ 1200 | 170 ـ 200 | 1300 ـ 1400 | 1300 ـ 1350 |
| مقاومة الشدّ النهائية (ميغا باسكال) | 1250 ـ 1350 | 500 ـ 550 | 1200 ـ 1400 | 1800 ـ 1900 |
| الاستطالة (في المئة) | 4 ـ 8 | 60 ـ 80 | 1 | 1 ـ 3 |
| الكثافة (غ/ سم$^3$) | 7.60 ـ 7.75 | 7.80 ـ 7.90 | 7.55 ـ 7.63 | 7.55 ـ 7.63 |
| القساوة | 37 ـ 43 | 55 ـ 65 | 55 ـ 60 | 48 ـ 52 |

إن الفولاذات غير القابلة للصدأ من قبيل الـ 316L وPH 17-4 هي أكثر المواد استخداماً في تلك التطبيقات. يُستخدم الفولاذ 17-4 PH حيث يجب أن تتصف المكوّنات بقساوة فائقة أو بمقاومة اهتراء عالية، ومن أمثلتها الحواف القاطعة، في حين أن الفولاذ 316L يُستخدم في ظروف التآكل الشديد.

ومن مواد القولبة بحقن المسحوق الأخرى الفولاذات ذات نسبة الخلط المنخفضة، ومنها الـ Fe-2%Ni والـ Fe-8%Ni. تُستخدم هذه الفولاذات لمقاومة الاهتراء ولتحقيق مقاومة شدّ عالية في البيئات الزيتية المُحْكَمة السد، ومنها نظم التزويد بالدواء، حيث لا يُعتبر

التآكل مشكلة، ولا يوجد تماس مباشر مع نُسُج الجلد. أما التيتانيوم وخلائط الكوبالت والكروم المعروفة بمقاومتها للتآكل وتوافقها الحيوي، فهي في قيد البحث لاستخدامها في تجهيزات تجبير العظام القابلة للزرع.

أما تطبيقات السيراميكات في الصناعة الطبية، فهي قليلة عموماً بسبب هشاشتها، باستثناء تطبيقات تلبيس الأسنان. من تلك التطبيقات الممكنة للسيراميكات استخدام الـ $ZrO_2$ في المشارط وأدوات الجراحة، فخصائص السيراميكات الفائقة من حيث مقاومة الاهتراء تجعلها مثالية لتطبيقات حواف القطع. لكن أحد عوائق النمو في هذا الاتجاه هو عدم وجود حاجة إلى إعادة استخدام القطع تكفي لتبرير استخدام هذه التقانة المتقدمة.

ونظراً إلى أن تكاليف الرعاية الصحية تخضع إلى رقابة مستمرة، فإن على مصنِّعي الأدوات الطبية تخفيض أسعارها مع إبقائها رابحة. لذا فإن الدافع الحقيقي للقولبة بحقن المسحوق هو تحقيق الشكل النهائي بتكلفة أقل، مع تحقيق متطلبات أداء من قبيل المقاومة والمطاوعة ومقاومة التآكل.

ما زال الإنهاء السطحي عقبة في وجه المزيد من استخدام القولبة بحقن المسحوق، شأنها في ذلك شأن طرائق تعدين المسحوق الأخرى. والحقل الطبي كثير المتطلبات من حيث الجودة، خصوصاً عندما يتصل الأمر بحُسن المظهر وإنهاء السطوح. إن الاهتمام بالمظهر كبير هنا مقارنةً بمجالات أخرى من قبيل صناعة السيارات. فمهندسو السيارات يهتمون أكثر بالسماحيات الدقيقة، لا بتحوُّل المسنَّن إلى اللون الأسود أو الأزرق في أثناء التلبيد.

لكن ثمة بعض الاستثناءات، حيث يستفيد مصنِّعو التجهيزات من الإنهاءات الباهتة للسطوح التي توجد في نهايات أجهزة الجراحة والتشخيص التنظيريين، على سبيل المثال. فإنهاءات السطح الشديدة النعومة في نهايات المناظير تؤدّي إلى انعكاس ضوء الليف الضوئي إلى عين الجراح، جاعلة أداء مهمته صعباً. لكن الإنهاءات التي هي أشدّ لمعاناً ما زالت مطلوبة في تطبيقات الأساور والمقابض الجراحية، حيث تعطي الانطباع بسطح نظيف ومعقّم. يعتمد بعض المصنِّعين على درجات مختلفة من المواد للحصول على إنهاءات سطحية أنعم.

## سيرورات إنتاج متخصصة أخرى: القولبة بحقن المعدن

تتصف القطع المصنوعة ابتداءً من مسحوق المعدن بأنها قوية كالفولاذ الصلب. وهذا هو المغري في تقانات القولبة بحقن المعدن (Metal-Injection-Molding) (MIM) التي تُنتِج قِطعاً بكثافات قريبة من الكثافات النظرية (أكبر من 95 في المئة)، مؤديةً إلى مقاومة شدّ ومُعَامل يونغ يضاهيان تلك التي للمعدن المصبوب، وإلى خواص ميكانيكية غالباً ما تكون مكافئة لتلك التي تعطيها طرائق تشكيل المعادن الأخرى، ومنها الصبّ بالشمع المهدور والتطريق والتشغيل، أو تتفوق عليها[43].

وليست القولبة بحقن المعدن بتقانة جديدة. إلا أن معظم تطبيقاتها تظهر فجأة لحل مشكلة في قطع مصنوعة بطريقة أخرى. لكن هذا يتغير مع استمرار المواد بالتحسُّن، واكتساب المصمّمين ومصنِّعي القولبة الخبرة، وظهور مزيد من القطع التي تصمّم خصيصاً للقولبة بحقن المعدن. يُضاف إلى ذلك أن إمكان صنع

قطع أكبر بهذه التقانة قد عزَّز استخدامها في التطبيقات الإنشائية، من القطع الطبية والجوية الفضائية الشديدة الدقة، حتى معدّات الرياضة والاستجمام.

تعمل القولبة بحقن المعدن مع طيف متوسع من الخلائط المعدنية. والقطع المنتَجة بهذه الطريقة جيدة المنافسة في الأسواق المتخصِّصة، حيث تزيد أوزان القطع على 200 غرام، وتتراوح سماكة جدرانها بين 0.25 و6.25 مم. أما السماحيات فيها فتساوي عادةً ± 0.3 في المئة، في حين أن إنهاءات السطوح التي يساوي جذر قيمتها التربيعية الوسطى 32 ميكروإنش (0.8 ميكرون) هي الشائعة. ويمكن لأْم تلك القطع ولحامها، وطلاؤها أيضاً، أو جلخها حتى تأخذ المقاس المطلوب، إذا اقتضى الأمر.

لكن القولبة بحقن المعدن قد لا تكون ملائمة لكل التصاميم المعقّدة والصغيرة الحجم، ومنها تطبيقات تَستخدم حالياً الخراطة المؤتمتة وسك الزنك. وعلى المصمّمين تقييم كل قطعة إفرادياً، آخذين في الحسبان تعقيدها واحتمال وجود عمليات تشغيل وإنهاء إضافية. فإذا كان تشغيل القطعة يحتاج إلى ثلاثة عمليات إعداد للأدوات أو أكثر، وإذا كانت سوف تُنتَج كمياً بمقادير تتجاوز 000 10 قطعة في السنة، فإن القولبة بحقن المعدن قد تكون أفضل اقتصادياً. يُضاف إلى ذلك أن لمتطلبات التصميم الكلي دوراً مهماً أيضاً في اتخاذ القرار.

### أساسيات المواد

تُعدُّ القولبة بحقن المعدن اجتماعاً للقولبة بحقن المواد الحرارية التلدّن، ولتقانة تعدين المسحوق المعهودة. تمزج المواد الرابطة من الشمع والمنظومات البوليمرية أو المائية مع مساحيق معدنية ناعمة

(مقاسات حُبيْباتها تقل عن 20 ميكرون) لتكوين خامة الحقن. تأتي خامات الحقن عادة على شكل درجات مختلفة من الفولاذ غير القابل للصدأ والحديد والنيكل، إضافة إلى أن التنغستين المغنطيسي الطري والتيتانيوم متوفّران أيضاً.

في الماضي، كان أصحاب معامل القولبة بالحقن يحضِّرون خامات الحقن في معاملهم، حيث كانوا يحدّدون تركيب مزيج المساحيق ومواد الربط بالتجربة والخطأ، مُنتجين خامات حقن «بيتية». لكن على غرار أي مادة تُقولب بالحقن، فإن خامات الحقن الموثوقة والمتناسقة يمكن أن تحسِّن كثيراً قابلية المعالجة وأداء القطع المصنَّعة. لذا ليس من المفاجئ الاستعاضة عن خامات الحقن البيتية بمواد محضَّرة من قبل شركات متخصِّصة توفِّرها تجارياً بدرجة كبيرة من التناسق والجودة.

ثمة أنواع مختلفة من المواد المستخدمة في منظومات الربط، إلا أنها جميعاً تعمل بصفتها حوامل لجُسيْمات المعدن قابلة للانسياب. تُحقن خامات الحقن في قوالب مشابهة لتلك المستخدمة في القولبة بحقن المسحوق بواسطة تجهيزات الحقن الشائعة. إلا أن بعض الخامات قد تحتاج إلى تجهيزات قولبة وحقن وأدوات معدّلة متوافقة مع لزوجة المادة العالية وطبيعتها الكاشطة اللطيفة.

تُدخَل خامة الحقن إلى مكبس الحقن عبر قمع التلقيم الموجود خلف الآلة. وتُسخَّن المادة حتى تتلدَّن، وتُضغَط عبر الحلزون إلى داخل البرميل، ثم تُحقن في فجوة القالب عبر نهاية حلزون الحقن التي تنغلق تلقائياً. وتبرد المادة وتتصلَّد ضمن القالب قبل لفظها على شكل قطعة «غضّة». يُشار إلى أن القوالب يمكن أن تحتوي على مَجارٍ ونوى مختلفة، وهذا ما يمكِّن من إنتاج أشكال أكثر تعقيداً مما يمكن تحقيقه بالتشغيل أو السك.

تكون القطع الغضة، القابلة للكسر إلى حد ما، أكبر حجماً عادةَ بـ 10 ـ 20 في المئة من حجم القطعة النهائي، إلا أنه يمكن جلخ المادة الزائدة من القطعة وهي في الحالة الغضّة.

**إزالة الرابط والتلبيد**

بعد القولبة، تخضع القطعة الغضّة إلى خطوة إزالة الرابط، حيث يحصل التخلّص من معظمه. خلافاً لطرائق تعدين المسحوق الأخرى، تحتوي القطعة المقولبة بحقن المعدن على ما يصل إلى 40 في المئةح من الرابط الذي تجب إزالته. لذا يجب أن تتصف خامات الحقن دائماً بالخصائص نفسها، وبمعدّل تقلُّص قابل للتوقّع في أثناء عمليات المعالجة التالية، بحيث يأخذ القيمة نفسها في جميع القطع المقولبة.

في الخطوة الأولى من التخلُّص من الرابط يُزال القسم الأكبر منه، لكن كثافة القطعة تبقى عند هذه المرحلة أقل من تلك التي للمعدن الأساسي بسبب وجود فراغات بين جُسيْمات المعدن، إضافة إلى بقايا الرابط. وبعد خطوة إزالة الرابط الأولى، تصبح القطعة أكثر هشاشة، ويُقال عنها إنها في حالة «سمراء».

تعتمد طريقة التخلُّص من الرابط ومدتها على الرابط المستخدم وحده فقط. يمكن لمنظومتي الشمع أو الأوليفين المتعدّد أن يُزالا إما حرارياً، أو بواسطة مذيب، أو بكليهما. أما الرابط بولي أسيتال، فيجب إزالته كيميائياً بحمض الآزوت ضمن جو من غاز النيتروجين في فرن مستقل. أما بوليمر PVOH المتحلمئة جزئياً، فتنحل بالماء. ويُزال بولي البروبيلين والملدِّنات المتبقّية حرارياً. وتُزال منظومات الربط القائمة على هلام الطحالب (الأغار (Agar)) بالتجفيف الهوائي

البسيط عند درجة حرارة الجو المحيط (قد تكون ثمة حاجة إلى تجفيف قصير المدة في فرن للقطع الكبيرة أو السميكة الجدران).

بعد إزالة الرابط يأتي التلبيد، وهو سيرورة عالية الحرارة تحصل في جو متحكَّم به لتصليد جُسيْمات المسحوق المعدنية بالتغلغل. يُجرى التلبيد في فرن عند درجات حرارة تقل قليلاً عن درجة انصهار المعدن المستخدم. ويحصل التلبيد والتكثيف من خلال سيرورات متعدّدة منها التغلغل الحجمي (Volume Diffusion)، وتغلغل الحدود الحُبَيْبية (Grain Boundary Diffusion)، والتغلغل السطحي (Surface Diffusion). وفي بعض الحالات يُستخدم الطَور السائل لتسريع التلبيد.

يبدأ التلبيد بتسخين أولي للقطعة المقولبة لإزالة الرابط المتبقّي. إن هذه المرحلة ضرورية للتخلُّص من جميع الرواسب أو الملوّثات التي يمكن أن تُسيء إلى خواص المعدن الميكانيكية. ويتضمّن جدول التلبيد عادة قيم درجات الحرارة ومعدّلات تزايدها وفترات البقاء في قيد التلبيد، ومعدّلات التبريد اللازمة لكل من المواد المُقَولبة والأفران المُستخدمة. ويُحدَّد في الجدول أيضاً نوع الجو: هيدروجين، نيتروجين، خلاء، أو تراكيب منها.

ويعتمد نجاح التلبيد على كل من المعدن الذي تجري معالجته، وعلى مواصفات الفرن المستخدم، لذا يجب الأخذ في الحسبان العلاقة المتبادلة بينهما. بعد التلبيد، تكون جُسيْمات المعدن قد تصلدَّت وتكثَّفت في كتلة صلبة ذات كثافة تساوي كثافة المعدن المطرّق النظرية تقريباً.

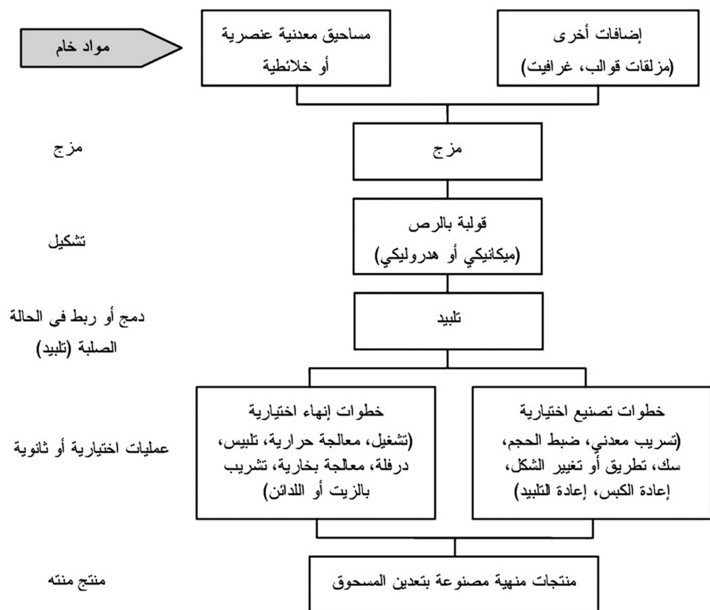
## مقارنةً القولبة بحقن المعدن بالسيرورات الأخرى

تتصف القولبة بحقن المعدن بعدد من المزايا مقارنةً بالسيرورات

المعتادة، ومنها الصبّ بالشمع المهدور، والكبس والتلبيد، والسك، والتشغيل (انظر الأشكال 6 ـ 7، 6 ـ 8، 6 ـ 9)[47][44].

يتطلب الصبّ بالشمع المهدور بناء قوالب إفرادية لكل قطعة تُنتَج. وتأخذ القطع الناتجة من السكب أشكالاً تُعتبر بمعايير القولبة بالحقن خشنة وغير دقيقة وتحتاج إلى عمليات إنهاء إضافية. فالسطوح فيها تكون خشنة، وأخطاء الأبعاد كبيرة. وتنتشر الحفر والفراغات فيها عندما تزيد سماكات الجدران على 19 مم، وتكون الجدران الرقيقة صعبة الملء. وتحتاج قطع الصبّ إلى بوابات لتسمح بتدفّق المواد، وقد يكون من الصعب إخفاء آثار تلك البوابات في القطعة التي يمكن أن تقلِّل من جمال مظهرها. أما خطوات الإنتاج فيمكن أن تتضمّن تكوين الأشكال وتجميع الشجرة وتكوين القالب والتجصيص وإزالة الشمع، إضافة إلى عمليات الشَيّ والسكب والإخراج من القالب، وخطوات الإنهاء التي هي من قبيل سد الثقوب والتشغيل والصقل، والتي جميعها تمثِّل أعباء إضافية في السيرورة.

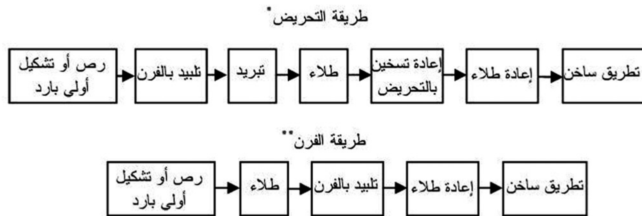
أما سيرورات الكبس والتلبيد فهي، على غرار القولبة بحقن المعدن، تستخدم معدناً مسحوقاً كمادة خام. وعلى نحو مشابه لقولبة اللّدائن بالضغط، توضع المعادن المسحوقة في قوالب ثم تُرصّ بالكبس لتكوين شكل معيّن. ويدمج فرن التلبيد الجُسيْمات معاً ويزيد كثافة القطعة المنهية قليلاً. ومن مزايا هذه السيرورة إنتاج القطع الغضّة في مدد قصيرة، وقابلية القالب لإعادة الاستخدام. إلا أن هذه السيرورة لا تلائم من الناحية العملية إلا الأشكال الهندسية البسيطة، هذا علاوة على أن المقاومة الميكانيكية للقطع المصنوعة بها تقل عن تلك التي تتحقّق في القولبة بحقن المعدن، أو في المعادن المطرّقة (انظر الشكل 6 ـ 10)[43].



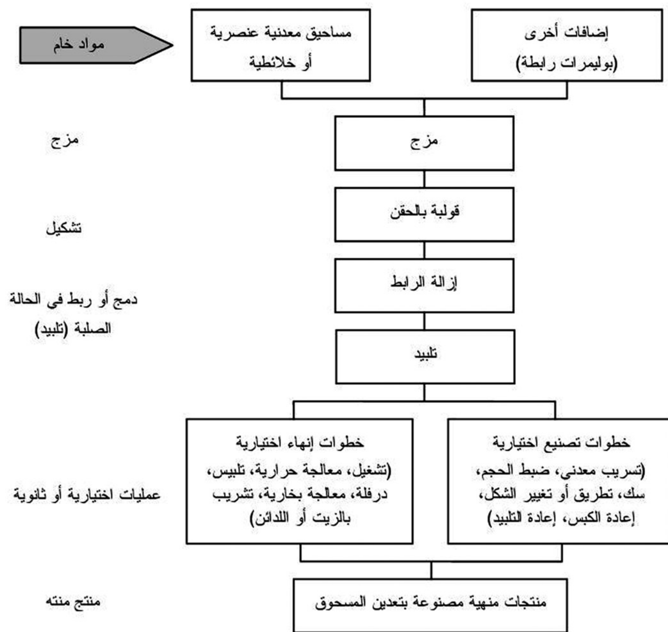

**الشكل 6 ـ 7: تصنيع قطع بتعدين المسحوق: السيرورة المعتادة.**

أما التطريق، فأفضل ما يلائمه هي الأشكال البسيطة. يُطرَّق المعدن المحمَّى ليأخذ الشكل المطلوب عند درجات حرارة وضغوط عالية. تُسكب أولاً سبائك المعدن على شكل أجزاء صغيرة تسخَّن وتوضع ضمن نصفي قالب تشكيل. ويبدأ تطريق المعدن باتجاه جدران القالب لتكوين القطعة. ويفرض الفقد الحراري إعادة التسخين ومزيداً من التطريق، وتُكرَّر العملية حتى يتكوَّن الشكل النهائي. ويزيد الرصّ المتكرر من مقاومة القطعة. لكن الثقوب المتقاطعة في التطريق غير ممكنة، ومن الصعب فيه تحقيق التسامحات المحدَّدة والحواف المستقيمة. يُضاف إلى ذلك أن ثمة عمليات تلي التطريق، منها اللحام والمعالجة الحرارية والتشغيل النهائي. أما أدوات التطريق،

فهي مُكلفة وذات عمر قصير، وفترات إنجاز تشكيل القطع طويلة، وتكاليف الإنتاج الكلية عالية نسبياً.

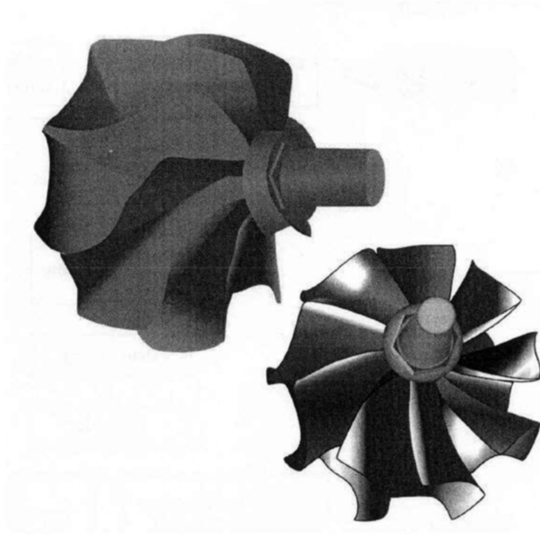



**الشكل 6 ـ 8: طرائق تطريق المسحوق التجارية.**




**الشكل 6 ـ 9: تصنيع قطع بتعدين المسحوق: سيرورة القولبة بحقن المعدن.**

أما تقانة تشغيل القطع إفرادياً فتعطي سماحيات دقيقة وأشكالاً معقّدة، إلا أن ثمة بعض القيود على تعقيد القطع مقارنةً بالتعقيدات الممكنة في القولبة بالحقن. يمكن تشغيل أي معدن تقريباً، ولا يغير التشغيل عادة من خواص المادة الخام. وثمة مراكز تشغيل جيدة التجهيز يمكن اللجوء إليها. والتشغيل هو السيرورة المفضّلة لإعداد النماذج الأولية وللإنتاج المحدود. إلا أن التشغيل يتطلب توظيف جهود واستثمار أموال، إضافة إلى أنه محدود من الناحية التصميمية. أما فترات الإنتاج فيه فهي طويلة، ولا تنخفض التكلفة بازدياد حجم الإنتاج.

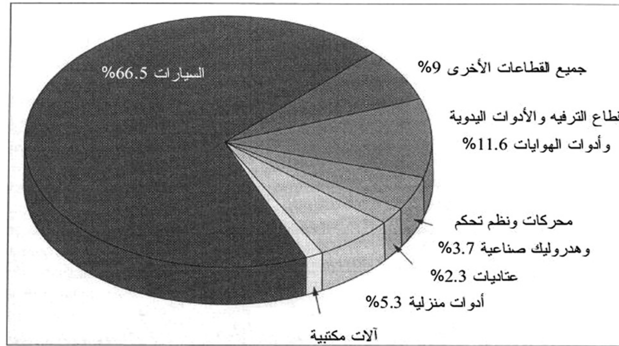


**الشكل 6 ـ 10: القلب الدوار لضاغط هواء محرك سيارة. لا يمكن إنتاج الشكل الثلاثي الأبعاد المعقد بالتشغيل بعدد صغير من الخطوات، في حين أن القولبة بحقن المعدن هي بديل عملي للصب بالشمع المهدور لإنتاج هذه القطعة الكبيرة الحجم إنتاجاً كمياً[43].**

## تطبيقات تعدين المسحوق

سوف تتزايد تطبيقات تعدين المسحوق من خلال التطويرات التي توفّر قيمة مضافة أكبر مما توفّره سيرورات معالجة المعادن والبوليمرات والسيراميكات الأخرى. تجدر الإشارة إلى أن تعدين المسحوق هو أسرع تقانات تشكيل المعادن نمواً اليوم. ومن المعادن التي تدفع هذه التقانة نحو التقدم خلائط تتصف بالمقاومة الميكانيكية العالية، وبمقاومة عالية للحرارة والتآكل، وفي مقدمها الفولاذات غير القابلة للصدأ.

يُظهر الشكل 6 ـ 11[47] حصة السيارات من سوق القطع المصنوعة بتعدين المسحوق التي بلغت 69 في المئة عام 1996 بالمقارنة بـ 66.5 في المئة في عام 1995. من القطع التي تُصنع بتعدين المسحوق شفة مفرِّع عادم السيارة، وحلقات المحمِّل المتعدّد الأجزاء في المحرّك، والمسنَّنات الحلقية الحلزونية، وآلية نقل الحركة من المحرّك إلى الدواليب ومُجِسَّاتها، وبطائن أسطوانات المحرّكات، وأغطية المحامل الرئيسة، وقضبان الوصل، وعتلات تحريك صمّامات المحرّك المصنوعة بالتلبيد.




**الشكل 6 ـ 11: توزُّع سوق القطع التي تُصنع بتعدين المسحوق ـ 1996**[47].

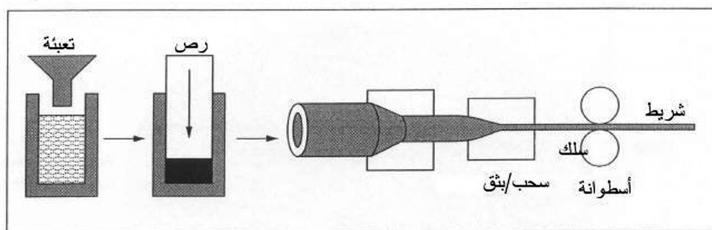
وباستخدام سيرورة القولبة بحقن المعدن، صُنعت خُرْزات (Staples) جديدة للجراحة التنظيرية من الفولاذ العديم الصدأ 17-4 PH. وصُنع المقص التنظيري الخطي الذي يجمع ما بين مفصل ثنائي بـ 45 درجة وحركة دورانية بـ 360 درجة، موفّراً قدرة عظيمة على المناورة والوصول إلى النُسُج في عمليات جراحية تنظيرية من قبيل استئصال الزائدة الدودية والاستئصال الجزئي للرئة.

وفي ما يخص الجانب العسكري، يُعدُّ النظام الدفاعي (Phalanx Close-In Weapon-System) (CIWS)[49] خط الدفاع الأخير للسفن، فهو يُطلق بسرعة قذائف خارقة بالطاقة الحركية على الصواريخ المعادية. إن العامل الرئيس الذي يؤثّر في أداء هذا النظام هو كتلة القذيفة الخارقة التي تبقى سليمة في أثناء اختراقها الهدف.

في السابق، كانت قذائف (Phalanx) الخارقة تُنتَج من اليورانيوم المنضَّب، أو من خليطة التنغستين ـ نيكل ـ حديد. فكلتا المادتين تتصفان بالكثافة العالية اللازمة للقذائف الخارقة بالطاقة الحركية. واليورانيوم المنضَّب جيد لاختراق مقاطع التدريع السميكة، إلا أنه يتشظّى حين اختراق الأهداف الصاروخية. أما خليطة التنغستين ـ نيكل ـ حديد التي حلت محل اليورانيوم المنضَّب فتتصف بأداء أفضل، لكنها تفقد قدراً كبيراً من كتلتها عند سرعات صدم تزيد على 1220 م/ثا.

أما الآن، فثمة تشكيلة جديدة تجمع خليطة تنغستين[49] إلى موسّطات سيرورة معدلة لصنع قذائف النظام الـ CIWS. تتصف هذه المادة بزيادةٍ مقدارُها 50 في المئة في كل من طاقة الصدم والكتلة المتبقّية، مقارنةً بخليطة التنغستين المستخدمة حالياً في الأسطول الأميركي، وتلك الزيادة تعادل زيادة مقدارها 100 في المئة في الكتلة المتبقّية مقارنةً بحالة اليورانيوم المنضَّب.

وثمة اهتمام بالنواقل الفائقة (Superconductors) التي تعمل عند درجات حرارة عالية، وذلك لاستخدامها في تطبيقات دفاعية مختلفة، منها توليد الطاقة، وتسيير الغواصات فوق وتحت سطح الماء، إضافة إلى نظم كاسحات الألغام. وفي الحقل التجاري، يمكن استخدام هذه المواد لتحسين أداء القطارات ذات الوسادة المغنطيسية، وتخفيض تكاليفها، وأداء نظم التصوير بالرنين المغنطيسي، والنظم المغنطيسية الفائقة الناقلية لخزن الطاقة، ونظم فصل المعادن. وبغية تسريع تطبيقات النواقل الفائقة عند الحرارة العالية، افتتحت شركة Concurrent Technologies Corp. مؤخّراً برنامجاً لتطوير وعرض هذه التقانة لإنتاج أسلاك وأشرطة طويلة (حتى 1 كم) فائقة الناقلية عند درجات الحرارة العالية (انظر الشكل 6 ـ 12).




**الشكل 6 ـ 12: خطوات سيرورة تشكيل أسلاك طويلة فائقة الناقلية تعمل عند درجات حرارة مرتفعة[49].**

تركَّز اهتمام مشروع النواقل الفائقة هذا بالمركَّب القائم على البيسموث المطلي بالفضة $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ أو (BSCCO)، المعروف بـ Bi-2212. واستُخدِمت فيه نماذج لسيرورة سحب الأسلاك ولفّها، للمساعدة على تطوير مواصفات سيرورة التصنيع، وجرى تطويرٌ لخواص المواد ولمعادلات إنشائية بُغية توصيف تشّوه مسحوق المادة وطريقة رصّه.

# الهوامش


1. V. A. Williams, «Net Shapes Are a Reality,» *Production* (March 1983), pp. 44-47.
2. P. K. Johnson, «P/M Technology Trends - 1997", *Intl. J. Powder Metall.*, 33 (3), 13-19 (1997).
3. E. J. Otto, and D. H. Herring, «Gears Heat Treatment - Part 1, «*Heat Treating Progress* (June 2000), pp. 55-59.
4. Toyota Central Labs Inc., 41-1, Aza Yokomichi, Oaza Nagakute, Nagakutecho, Aichi-ken, 480-1192, Japan; www.tytlabs.-co.jp.
5. E. H. Yoon, J. H. Hong and S. K. Hwang, «Mechanical Alloying of Dispersion-Hardened $Ni_3AlB$ from Elemental Powder Mixtures,» *J. Mater. Eng. Performance*, 6 (1), 106-112 (1997).
6. W. Yinjiang, L.Tao and Z. Lian, «Study of TiAl Alloys and Powders Produced by Infiltration Combustion Synthesis (ICS)", *J. Adv. Mater*. (October 2000), pp. 52-58.
7. S. T. Mileiko, A. M. Rudnev and M. V. Gelachov, «Carbon-Fibre/TitaniumSilicide-Interphase/Titanium-Matrix Composite,» *Compos. Sci. Technol.*, 55, 255-260 (1995).
8. «Low-Cost PM Route for Titanium Matrix Carbon-Fiber Composites,» *Powder Metall.*, 39(2), 97-99 (1996).
9. P.-A. de Chalus, «Copper-Iron-Cobalt P, M Alloys Extend Tool Life 30%, « *AM&P* (February 1998), p. 7.
10. E. Kubel, «Advancements in Powder Metallurgy Rhenium,» *Industrial Heating* (September 2001), pp. 47-51.
11. M. G. Barandika, J. M. Sánchez and E. Castro, «New Developments in $TiB_2$ Hard Metals,» *Met. Powder Rep.*, 49, 10 (1994).
12. J. M. Sánchez [et al.], «Consolidation, Microstructure, and Mechanical Properties of Newly Developed TiB2Based Materials,» *Scr. Met. et Mat.*, 26, 957(1992).
13. R. González, «WC-(Fe,Ni,C) Hardmetals with Improved Toughness through Isothermal Heat Treatments, «*J. Mater. Sci.*, 30, 3435 (1995).

14. R. González [et al.], «Consolidation of WC Cemented Carbides with Fe-Mn Metallic Binders,» *Met. Powder Rep.*, 5 (18), 69 (1994).
15. E. Castro, J. Urcola and M. Fuentes, P/M and Particulate Materials Research, « *Intl. J. Powder Metall.*, 33 (2), 19-29 (1997).
16. C. Zubillaga, [et al.], «Experimental Analysis of Tungsten Coarsening in a Heavy Metal,» *Acta Metall*, 37 (7), 1865 (1989).
17. K. O. Zamora, J. G. Sevillano and M. Fuentes Perez, « Flow Stress and Ductility of Tungsten Heavy-Metal Alloys,» in: A. Bose and R. J. Dowding, eds., *Tungsten & Tungsten Alloys* (Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992), p. 281.
18. K. O. Zamora, J. G. Sevillano and M. Fuentes, «Fracture Toughness of Tungsten Heavy Metal Alloys,» *Mater. Sci. Eng.* A, 157, 151 (1992)., J.
19. Yáñez, Urcola [et al.], «Stronger W-Ni-Fe Alloys by Solid Solution or Precipitation Hardening", in: A. Bose and R J. Dowding, eds., *Tungsten & Tungsten Alloys 1992* (Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992), p. 119.
20. A. B. Rodriguez and J. G. Sevillano, «Viscoplastic Flow of High-Density W-Ni-Fe Alloys during Liquid-Phase Sintering,» in: A. Bose and R J. Dowding, eds., *Tungsten & Tungsten Alloys 1992,* (Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation, 1992). p. 61.
21. R. Sundaresan and F. H. Froes, *J. Metals*, 39, 22-27 (1987).
22. R. Y. Lee, J. Jang and C. C Koch, *J. Less-Common Metals*, 140, 78-83, (1988).
23. C. C Koch [et al.], *Appl. Phys. Lett.*, 43, 1017-1019 (1983).
24. P. R. Taylor and S. A. Pirzada, *Adv. Performance Mater.*, 1, 33-50, (1994).
25. P. R. Taylor and S. A. Pirzada, in: H.Y. Sohn, ed., *Metallurgical Processes for the Early 21st Century* (Warrendale, PA: TMS, 1994), Vol 1, pp. 65-76.
26. P. R. Taylor [et al.], in: K Upadhya, ed., *Plasma Synthesis and Processing of Materials* (Warrendale, PA: TMS, 1993), pp. 215-225.
27. P. R. Taylor and S. A. Pirzada, U.S. Patent 5369241, November 1994.

28. P. R. Taylor and S. A. Pirzada, *Proc. EPD Cong. 1995,* G. Warren (ed.), Warrendale, PA: TMS, 1995, pp. 49-60.
29. R. W. Gardiner, *Mater. Des.*, 10, 274-279 (1989).
30. R. F. Bunshah, ed., *Deposition Technologies for Films and Coatings* (Park Ridge, NJ: Noyes, 1982), p. 131.
31. C. M. Ward-Close and P. G. Partridge, *Mater. Lett.*, 11 (8-9), 295-300 (1991).
32. T. R. Harman,» Novel Plasma Melting Process Produces Rapidly Solidified Metal and Alloy Powders, «*METPR 7, 546 (1986)*.
33. L. Donaldson, and F. G. Hanejko, «Effects of Processing Methods and Heat Treatments on the Mechanical Characteristics of High-Performance Ferrous P/M Materials,» *Industrial Heating*, 63 (9), 69 (1996).
34. J. MazumdER [et al.], «Rapid Manufacturing by Laser-Aided Direct Deposition of Metals,» Paper Presented at: *1995 World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, MPIF/APMI*, Washington, D.C. June 16-21.
35. G. K. Lewis [et al.], «Directed Light Fabrication of Near-Net Shape Metal Components, «Paper Presented at: 1996 World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, MPIF/APMI, Washington, D.C., June 16-21.
36. E. J. Whitney, F. G.Arcella and D. Krantz, «P /M Laser Manufacturing and Titanium Structures,» Paper Presented at: 1996 World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, MPIF/APMI, Washington, D.C., June 16-21.
37. D. Irretier,» Debindering and Sintering of Powder Metallurgical Parts during Batch Processing,» *Industrial Heating* (October 1999), pp. 111-116.
38. D. H. Herring, «Heat Treating P/M Parts,» *Heat Treating Progress* (June 2002), pp. 27-30.
39. K. H. Moyer and W. R.Jones, «Vacuum Sinter Hardening,» *Heat Treating Progress* (June 2002), pp. 65-69.
40. R. Kohl, « Metal Parts Right Out of the Microwave,» *Machine Design* (4 November 1999), p. 35.
41. P. Teague, «Powder Metal Parts Perfected in a Microwave Oven,» *Design News* (18 October 1999), p. 29.
42. «Hotter PIM Breathes Life into Medical Products,» *Mach. Design* (9 October 1997), pp. 78-82.

43. R. Wick and B. Ruhland,» Injecting More «Mettle,» into P/M Designs, *Mach. Design* (20 March 2003), pp. 51-54.
44. M. Puttré, M., Technology Has Steel Shining Like New, *Design News* (1 December 1997), pp. 69-72.
45. D. G. White, «P/M in North-America,» *Intl. J. Powder Metall.*, 32 (3), 221-227 (1996).
46. K. Dollmeier and E. Petzoldt,» P/M in Germany,» *Intl. J. Powder Metall.*, 33 (1), 39-43 (1997).
47. L. M. Rinek, «Evolving Prospects and Technology Developments for Powder Metallurgy Parts,» *SRI Intl.*, D95-1922, 13(1993).
48. P. K. Johnson, «P/M Industrial Trends New Technologies Propel P/M Growth,» *Intl. J. Powder Metall.*, 32 (2), 145-153 (1996).
49. H. A. Kuhn and F. R. Dax,» Powder Metallurgy Product and Process Development at Concurrent Technologies Corporation,» *Intl. J. Powder Metall.*, 32 (3), 229-238 (1996).

# المراجع

Becker, B. S. and J. D. Bolton. « Production of Porous Sintered Co-Cr-Mo Alloys for Possible Surgical Implant Applications: 2. Corrosion Behavior." *Powder Metall.*:, 38(4), 305-313, 1995.

Bee, J. V. and E. Toussaint. « P/M in Australia.,» *Intl. J. Powder Metall.*: 33 (1), 33-37, 1997.

Chung, H. S. and B. Kim,. «Powder-Metallurgy at KIMM, Korea.,» *Intl. J.* Powder Metall.: 32 (2), 137-143, 1996.

"Compaction and Sintering Characteristics of Composite Metal Powders.,» *J. Mater. Proc. Technol.*: 63 (1-3), 364-369, 1997.

Datta, P. and G. S. Upadhyaya. « Effect of Sintering Variables on the Properties of 316L and 434L Stainless Steels.,» *Industrial Heating*: June 1999, pp. 37-41.

Dunkley, J. «Powder Metallurgy & Particulate Materials Technology 1994.,» *Powder Metall.*: 37 (2), 101-104, 1994.

Froes, F. H., C. Suryanarayana and P. R. Taylor. «Synthesis of

Advanced Metals by Powder-Metallurgy Techniques.,» *Powder Metall.*: 3 (1), 63-65, 1996.

Garg, D. [et al.]. «Effective Atmosphere for Iron-Copper-Carbon Components.,» *Industrial Heating*: August 1997, pp. 39-43.

Gamer, H. A. «Heat-Treated Powder Metal High-Speed Steel Tools Last Longer in Heavy-Duty Nail Production.,» *Industrial Heating*: June 1996, pp. 40-42.

Harley, M. «Polymers for Ceramic and Metal Powder Binding Applications.,» Ceram. *Industry*: November 1995, pp. 51-55.

Hebelsin, J. C. «On an International Scale, What's Hip about HIP?,» *Design News*: 9 June 1997, p. 196.

James, W. B. «Considerations in the Development of Ferrous P/M Alloys for Sinter Hardening Applications.,» *Industrial Heating*: September 1999, pp. 63-67.

Johnson, J. J. and R. M. German. «Pinpointing Parts for PIM.,» *Mach. Design*: 7 August 7 2003, pp. 52-53.

Kaufman, S. M. «Are Conventional SAE Alloy Steels Coming to Powder Metallurgy?,» *Modern Metals*: March 1996, pp. 44-46.

Kneringer, G. and Stickler, R. «Powder Metallurgy in Austria.,» *Intl. J. Powder Metall.*: 32 (3), 213-220, 1996.

Mahidhara, R. K. «Degradation of RSP /PM Al-8Fe-4Ce during Creep*, J. Mater.Eng. Performance*: 5 (2), 256-259, 1996.

Molins, C. (Jr). «Powder-Metallurgy in Spain.,» *Intl. J. Powder Metall.*: 32 (2), 127-134, 1996.

Pennington, J. N. « Exploring Powder Forging.» *Modern Metals*: February 1996, pp. 32-35.

Philips, T. and Nayar, H. A. «A Troubleshooting Guide for Sintering Furnace Atmospheres.,» *Industrial Heating*: August 1997, pp. 33-37.

Stoltzfus, J. M. «Making Pure Oxide Powders.,» *NASA Tech Briefs*: January 1997, p. 56.

Tengzelius, J. and O. Grinder. « Powder Metallurgy in Sweden.,» *Intl. J. Powder Metall.*: 32 (3), 203-210, 1996.

Upadhyaya, G. S. «P /M Trends in India.,» *Intl. J. Powder Metall.*: 32 (2),117-125,1996.

# 7

# الأنابيب النانوية

## تقديم

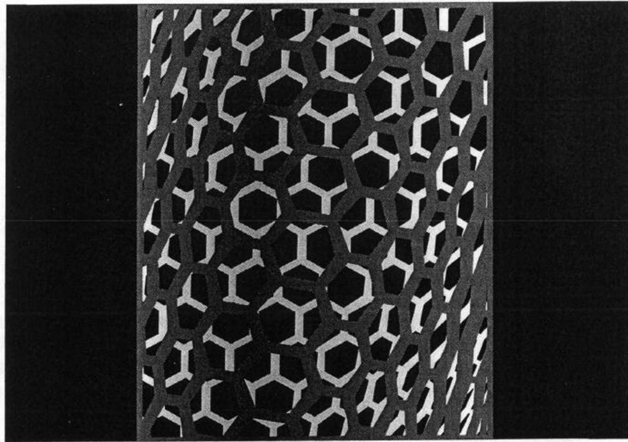
تخيَّل جُزَيئاً منفرداً قطره أصغر بـ 50 000 مرة من قطر شعرة الإنسان، وأقوى بـ 100 مرة من الفولاذ. إن هذا الجُزَيء غير مرئي بالعين المجردة، ومع ذلك يمكن أن يُحدث ثورة في تقانة المواد. لقد سيطر العلماء على تحضير وتوصيف مكوِّنات في السلّم الميكروي، إلا أن اكتشاف جُزَيئات الكربون التي تسمّى أنابيب نانوية (Nanotubes)، فرض اهتماماً جديداً بالمواد في السلّم النانوي (سلم المقاسات التي تقل عن 100 نم) .

### تعريف أنابيب الكربون النانوية وبنيتها

يتكوَّن أنبوب الكربون النانوي من صفيحة واحدة من الغرافيت ملفوفة على شكل أنبوب مع أغطية فُلَّرينية عند النهايتين (انظر الشكل 7 ـ 1)[1]. يبدو الأنبوب الكربوني النانوي كأسطوانة قطرها يساوي نحو 1 نم، وطولها يساوي بضعة ميكرونات. تخيَّل لفَّ صفيحة من الغرافيت على شكل أنبوب. ذاك هو ما نتكلم عنه. وبناءً على طريقة المعالجة، يمكن للأنابيب النانوية أن تمتلك جدراناً متعدّدة على شكل أسطوانات

متمركزة معاً حول الأنبوب الداخلي. إلا أن الأنابيب المتعدّدة الجدران تحتوي على عيوب يمكن أن تحد من خواصها. لذا فإن الأنابيب الوحيدة الجدار تُعتبر ذات أهمية خاصة لتطوير المواد. مع ذلك، سوف يغطي هذا الفصل أيضاً الأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران.

تحتوي الجُزَيئات الفلَّرينية المتطاولة الوحيدة الجدار على ملايين من ذرّات الكربون التي تحتل كل منها مكاناً مخصّصاً لها لتكوين بنية جوفاء عديمة العيوب ذات محيط مكوّن من بضع ذرّات فقط. وتساوي أطوال الأنابيب النانوية آلاف المرات من أقطارها، وهي تتصف بخواص ميكانيكية وكهربائية وحرارية استثنائية.



**الشكل 7 ـ 1: رسم توضيحي لأنبوب نانوي وحيد الطبقة. تتكوَّن البنية الأسطوانية من شبكة سداسية على شكل شبكة خلية النحل من كربون بروابط أساسها** $sp^2$ **من دون روابط متدلِّية. تخيَّل طبقة من الغرافيت قد طُويت بحيث تتطابق الحواف التي تحتوي على الروابط المتدلِّية؛ تمثِّل الأسطوانة المكوَّنة بهذه الطريقة وحدة الأنبوب النانوي الأساسية. وفي الأنابيب المتعددة الجدران، تتمركز أسطوانات ذات أقطار مختلفة بعضاً حول بعض بمسافات فاصلة تساوي 0,34 نم. وفي حبال الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار، تتوضَّع عشرات الأسطوانات ذات الأقطار المتجانسة (نحو 0.5 نم) على شكل شبكة مثلثية[1].**

أنابيب الكربون النانوية هي من حيث الأساس بلّورات كربون جوفاء أقوى من الفولاذ وأشد ناقلية للكهرباء من النحاس. لذا يمكن لأنابيب الكربون النانوية أن تحسِّن قريباً بطاريات الليثيوم، وأن تحل محل ألياف الكربون في المواد المركَّبة. ويمكن استخدام صفيفات أنابيب الكربون النانوية المصطفة لتكوين مُجِسَّات كيميائية، وملاقط نانوية، وتجهيزات أخرى من قبيل منتجات الإصدار الحقلي (Field Emission)، ومنها الشاشات المسطحة. ويمكن استخدام التصاميم القائمة على صفيفات الأنابيب النانوية أيضاً لتحقيق خفض كبير في تكاليف المكوِّنات البصرية، ومن أمثلتها تجهيزات تنضيد إشارات الألياف الضوئية.

ونظراً إلى أن أنابيب الكربون النانوية هي مجسَّمات كربون سداسية مرتبة ترتيباً متمركزاً، فإنها يمكن أن تكون ناقلاً أو نصف ناقل، بناءً على مقاسات أقطارها وعلى حلزونية ترتيب حلقات الغرافيت في جدرانها.

لقد صُنعت خيوط من أنابيب الكربون النانوية تصل أطوالها إلى 100 متر في جامعة تكساس في دالاس، وفي كلية ترينيتي في دبلن بإيرلندا، بمتانة تساوي ثلاثة أضعاف أمتن المواد الطبيعية، وهي حرير العنكبوت.

يساوي قطر الخيط نحو 50 ميكروناً، ويحتوي الخيط على مئات الترليونات من الأنابيب النانوية في السنتيمتر الواحد من الطول. وقد استُخدمت لصنع الخيوط تقنية طوَّرها فيليب بولان (Philippe Poulin) لدى الـ CNRS في بوردو بفرنسا[4][2].

يُحقن محلول مائي من أنابيب الكربون النانوية مع خافض للتوتر السطحي في خرطوم يتدفّق عبره محلول من بولي فينيل

الكحول (Polyvinyl Alcohol). ويتخثّر المحلولان لتكوين ليف هلامي شبيه بالمطّاط، يُلف على بكرة. وفي سيرورة مستمرة أخرى، يُفرد الليف الهلامي ويُغسل ويُجفَّف لتكوين ليف بوليمر صلب بطول غير محدود. يحتوي الليف الناتج على 60 في المئة من أنابيب الكربون النانوية يربط بينها بولي فينيل الكحول.

لم يتمكن مطوِّرو الليف من العثور على أي مادة أمتن من ألياف أنابيب الكربون النانوية المركَّبة[4]. قد تكون متانة هذه الألياف ناجمة عن التغيّرات البنيوية في أثناء المطّ التي تؤدّي إلى اصطفاف الأنابيب النانوية في اتجاه الليف الطولاني.

يمكن استخدام هذه الخيوط أيضاً مكثفاتٍ لخزن شحنات كهربائية صغيرة جداً، ولتزويد تجهيزات مضمَّنة في الملابس بالطاقة. إلا أن تحسين خواصها الكهربائية يمثّل مفتاح التحدّيات المستقبلية لجعلها أشدّ ناقلية ومسامية.

تلك هي الخواص المهمة لصنع مُحسَّات من هذه المواد، ولصنع ألياف أخفّ مع بقائها شديدة الناقلية الكهربائية.

## تنمية أنابيب الكربون النانوية وتصنيعها

إن أكثر الطرائق شيوعاً لإنتاج ألياف الكربون النانوية هي الحتّ الليزري، والقوس الكهربائية، وتوضيع الأبخرة كيميائياً. إن نمو الأنابيب النانوية ليس مفهوماً تماماً، إلا أن من المعروف أن استخدام محفِّزات معدنية ضروري لاستمرار نمو الأنابيب. ومن دون هذه المحفِّزات، تتكوَّن الفلَّرينات باستخدام السيرورات نفسها الأساسية.

وجد المهندسون في جامعة كاليفورنيا ببركلي طريقة مبتكرة

لتنمية أسلاك نانوية من السليكون مع أنابيب كربون نانوية مباشرة على بُنى ميكرويّة في حجرة عند درجة حرارة الغرفة، فاتحين الأبواب أمام التسويق السريع والرخيص لعدد هائل من التجهيزات القائمة على التقانة النانوية.

استطاع أولئك الباحثون أن يُركِّزوا الحرارة المفرطة اللازمة لنمو الأسلاك والأنابيب النانوية في المواضع بدقة بضعة ميكرونات، أي ضمن ما يعادل عُشْر قطر شعرة الإنسان، وبذلك تمكَّنوا من حماية الإلكترونيات الميكرويّة الحسّاسة التي بقيت عند درجة حرارة الغرفة.

وألغت التقنية الجديدة الخطوات الوسيطة البطيئة من سيرورة صنع المُحِسَّات التي تحتوي على أنابيب وأسلاك نانوية. يمكن لتلك المُحِسَّات أن تتضمّن كواشف للأمراض في المراحل المبكرة، وأن تدل على وجود فيروس واحد فقط، أو أن تعمل مُحِسَّاً كيميائياً حيوياً فائق الحساسية يتحسَّس وجود بضعة جُزَيئات من مادة سامة.

أما الخطوات المستخدمة في صنع الأسلاك النانوية، فهي نفسها المستخدمة في الأنابيب النانوية، مع أنه يمكن استخدام مواد كيميائية ودرجات حرارة مختلفة. وقد استخدم باحثو جامعة كاليفورنيا ببركلي في هذه الحالة خليط نيكل ـ حديد مع بخار الأسيتيلين لصنع أنابيب الكربون النانوية.

نُفِّذت سيرورة صنع الأسلاك والأنابيب النانوية في فرن عند درجات حرارة بين 600 و1000 مْ. وقد بدأت الإجراءات بشريحة أو ركيزة سليكون مساحتها 1 سم$^2$، مطلية بغشاء رقيق من خليطة معدنية. ثم وُجِّه البخار نحو الركيزة، فعملت الخليطة المعدنية محفِّزاً للتفاعل الكيميائي الذي ولَّد في النهاية مليارات من الأنابيب أو الأسلاك النانوية المترسِّبة.

وُضعت المادة النانوية الناتجة في مذيب سائل من قبيل الإيثانول، وسُلِّطت عليها أمواج فوق صوتية لنزعها من سطح الركيزة. بعدئذٍ كان على الباحثين البحث ضمن مليارات الأسلاك أو الأنابيب النانوية للعثور على بضعة منها تحقّق المواصفات المطلوبة في تطبيقات المجِسَّات.

وبدلاً من البحث عن طريقة لتنمية المواد النانوية، كل على حدة، ثم جمعها معاً في نظم أكبر، قرَّر الباحثون تنمية أسلاك السليكون النانوية وأنابيب الكربون النانوية مباشرةً معاً على لوحة الدارة. والصعوبة التي واجهتهم حينئذٍ كانت حماية الإلكترونيات الميكرويّة الحساسة التي يمكن أن تنصهر عند درجات الحرارة العالية جداً اللازمة لتكوين المواد النانوية. إلا أن تسخين المقاومة كهربائياً (Resistive Heating) وفَّر الجواب: يتدفّق تيار كهربائي عبر السلك فيسخِّنه، تماماً على غرار تسخين أسلاك مشواة الخبز.

مرَّر الباحثون التيار الكهربائي عبر سلك إلى الأمكنة المحدّدة على البنية الميكرويّة، حيث أرادوا تنمية الأسلاك والأنابيب النانوية. وسُخِّنت منطقة في إحدى التجارب حتى 700 مْ، وبقيت بقعة أخرى مجاورة لها على بُعد بضعة ميكرونات عند درجة حرارة تساوي 25 مْ. ووُضعت لوحة الدارة برمتها ضمن حجرة مخلاَّة من الهواء بُغية إجراء تلك الاختبارات التي مثّلت المكاملة المباشرة للمواد النانوية في سلم المقاسات الميكرويّة.

نتجت من تلك التجارب أسلاك نانوية أقطارها بين 30 و80 نم، ووصلت أطوالها حتى 10 ميكرون، وكانت أقطار الأنابيب النانوية في المجال من 10 حتى 30 نم، ووصلت أطوالها حتى 5 ميكرون. لقد كانت طريقة فريدة، فهي تسمح بصنع مُجِسٍّ نانوي كامل بسيرورة مشابهة لتلك المستخدمة في صنع رقاقات الحاسوب، من دون الحاجة إلى تجميع لاحق.

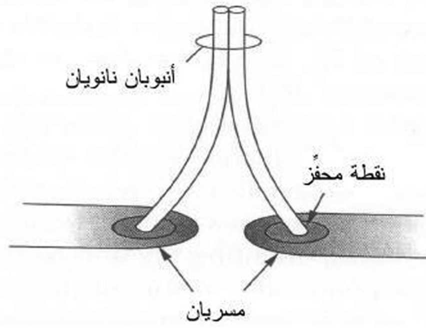
استُخدمت في توضيع البخار كيميائياً في إحدى الطرائق السابقة بعض الغازات الهيدروكربونية كالميثان مع محفِّز تفاعل كالحديد. واستُخدمت في سيرورة أخرى تسمّى توضيع البخار كيميائياً المحسَّن بالبلازما، بلازما منخفضة الحرارة لتنمية الأنابيب النانوية.

وبيَّنت تجارب أخرى إمكان صنع أنابيب نانوية، باستخدام سيرورة طَور غازي كفوءة، أقطارها تساوي نحو 0.6 نم. تتضمّن هذه الطريقة توضيع البخار كيميائياً في جو من أول أُكسيد الكربون العالي الضغط، وهي تمثل تقنية تنمية جيدة لاستخدامها في الإنتاج المُجدي التكلفة لكميات كبيرة من الأنابيب الميكرويّة الوحيدة الجدار. وقد أدّى أيضاً تطوير طرائق جديدة لتنقية وتوصيف الأنابيب النانوية إلى رؤية جديدة لآليات نموّها، وثمة بيانات جديدة مستمرة في الظهور عن أشكال وتوزُّعات أطوال الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار، المُنمَّاة بطرائق فرن الليزر المعهودة.

واقتُرحت طريقة لتطوير مفعِّلات ثنائية البنية (Bimorph) ومحِسَّات قوة تقوم على أنابيب الكربون النانوية. قد تمكِّن تلك المفعِّلات والمُحسَّات المقترحة من توليد وتحسُّس الانزياحات والقوى في السلّم الجُزَيئي والتحكُّم بها، ويمكن أن تكون متكاملة فعلاً مع الدارات الإلكترونية العادية. وقد تمكِّن من تطوير نظم كهروميكانيكية ميكرويّة جديدة ومتنوعة، ومنها معالجات إشارة ميكانيكية منخفضة استهلاك الطاقة، ومفعِّلات ومحِسَّات قوة نانوية المقاس، وحتى روبوتات ميكرويّة.

تستغل التجهيزات المقترحة اعتماد طول الأنبوب النانوي على حقن الشحنة الذي شوهد في حصائر أنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار غير المنتظمة[4]: تصبح الأنابيب أطول حين تطبيق جهد سالب عليها، وأقصر عند تطبيق جهد موجب. توحي هذه النتيجة بأنه

يمكن توليد تغيّرات متعاكسة في طولَي أنبوبين متجاورين جنباً إلى جنب، لهما شحنتان مختلفتان، وهذا ما يؤدّي إلى انحراف جانبي لطرفي الأنبوب غير المثبّتين وفق المبيّن في الشكل 7 ـ 2. يتطلب صنع مثل هذه التجهيزة الثنائية الشكل المقدرة على إنتاج وربط الأنابيب بالتشكيلة المطلوبة، حيث يكون أحد طرفي كل أنبوب موصولاً مع تماس كهربائي مناسب.




**الشكل 7 ـ 2: يمكن لأنابيب الكربون النانوية أن تنمو من نقطتي معدن محفِّز على مسريين لترتبط في النهاية معاً بقوى فان در فالس، مكوِّنة مفعِّلا أم مُحِسّاً ثنائي الشكل**[3].

يمكن تصنيع التجهيزة الثنائية الشكل بتنمية أنبوبين نانويين بتوضيع البخار كيميائياً على نقطتي محفِّز قريبتين من بعضهما البعض فوق مسريين كهربائيين سبق أن جرى تشكيلهما على ركيزة. ومن المحتمل في أثناء نمو الأنابيب النانوية، أن تسبب قوة فان در فالس التجاذبية (Van der Waals Attraction) التصاق الأنبوبين على طول جانبيهما وفق المبين في الشكل 7 ـ 2. ونظراً إلى أن ناقلية الأنبوب النانوي في الاتجاه المعامد لطوله أقل كثيراً من تلك التي في اتجاه الطول، يمكن لهذه التشكيلة أن تجعل من الممكن الحفاظ على فرق

جهد ملحوظ بين الأنبوبين بقدر يكفي لإحداث تغيّر في الفارق بين طوليهما. أو يمكن أن يحصل العكس، حيث يمكن لتطبيق قوة خارجية جانبية على أعلى الأنبوبين أن يؤدّي إلى نشوء فرق جهد بين القطبين، أي إن هذه التجهيزة يمكن أن تعمل كاشفاً للقوة جيد الحساسية.

وبغية التمكن من صنع مفعِّلات ثنائية البنية من أنابيب نانوية وفق المبين في الشكل 7 ـ 2، من الضروري تطوير وسائل التحكُّم بمواقع واتجاهات الأنابيب النانوية إفرادياً على ركائز من قبيل شُراحات السليكون. وهذا ما قد يستدعي تكوين الأشكال بالحزمة الإلكترونية، وإزالة الزوائد، والحفر لتكوين نقاط المحفِّز بأقطار تقع بين 5 و15 نم على مسارٍ مشكّل سابقاً. أما المواد المحفِّزة، فيمكن أن تكون من النيكل، أو من خلائط النيكل، أو الكوبالت، أو الحديد، أو الموليبدن. وفي سيرورة توضيع البخار كيميائياً المقترحة، يمكن لمواد أولية وغازات حاملة (كالميثان أو الإيثيلين، أو أول أُكسيد الكربون مع الهيدروجين وأرغون الإيثر أو النيتروجين) أن تتفاعل مع الركيزة (التي تُسخَّن حتى درجة حرارة بين 600 و950 مْ) لتحقّق نمواً انتقائياً للأنابيب النانوية انطلاقاً من نقاط المحفِّز. وثمة أنماط ممكنة كثيرة مختلفة لطريقة التصنيع الأساسية هذه، ومن بينها طريقة توجِّه النقاط بحيث تنمو الألياف موازية لسطح الركيزة (بدلاً من أن تكون عمودية عليه)، وتتضمّن استخدام مواد أخرى لتعديل الخواص الميكانيكية والكهربائية لأزواج الأنابيب النانوية[(3)(4)].

وطُوِّرت سيرورة محسَّنة لدى مركز بحوث آمس (Ames Research Center) لتصنيع مسابر من أنابيب كربون نانوية بغية استخدامها في مجاهر القوة الذرّيّة (Atomic Force Microscopes) (AFM)، وفي أدوات التداول النانوية. ومقارنةً بالسيرورات السابقة

لصنع نهايات المسابر، توفِّر هذه الطريقة بعض المزايا من حيث اصطفاف الأنابيب النانوية على الركيزة واستقرار تثبيتها. وطُوِّرت أيضاً إجرائية في مركز البحث المذكور تجعل الأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران أرقّ، وهذا يحسِّن مَيز المسابر المصنوعة من تلك الأنابيب. فإذا أضيف هذا إلى استقرار تلك المسابر الأشدّ، تحسَّن مَيز المسابر المصنوعة من الأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران ليصبح من رتبة مَيز تلك المصنوعة من الأنابيب الوحيدة الجدار. والتثبيت المتين الناجم عن طريقة التصنيع المحسَّنة تلك، إضافةً إلى قوة ومرونة الأنابيب النانوية الطبيعيتين، تجعل عمر مسابر مجهر القوة الذريّة في التصوير طويلاً جداً. ففي اختبار لطول العمر، صوَّرت نهاية مسبر مصنوعة من أنابيب نانوية سطحاً من $Si_3N_4$ مدة 15 ساعة من دون حصول نقصان في المَيز يمكن قياسه. بالمقارنة، يبدأ مَيز المسبر المصنوع من السليكون بالتدهور تدهوراً ملحوظاً خلال دقائق. ثمة الكثير من التطبيقات لمسابر أنابيب الكربون النانوية في صناعة أنصاف النواقل، وبخاصة مع اقتراب التجهيزات المصنوعة من المقاسات النانوية، علاوةً على أن التقنيات الجديدة لتوضيع الطبقات ذرّياً تتطلب تقنيات توصيف عالية المَيز. وقد أجرى مركز آمس عرضاً لمسابر من أنابيب نانوية استُخدمت لتصوير أشكال على مادة تتبلمر ضوئياً (Photoresist) ذات نسب بُعدية كبيرة. يُضاف إلى ذلك أن تلك النهايات استُخدمت لتحليل مُحاكيات حُبيْبات غبار المريخ، وبلّورات بروتين الإكستريموفيل (Extremophile Protein)، وبنْية الدَنَا (DNA).

أعلن باحثون في التقانة النانوية بجامعة تكساس في دالاس، وفي كلية ترينيتي في دبلن بإيرلندا، كشفاً علمياً يخص غزْل ألياف مركَّبة من ألياف الكربون النانوية أمتن من أي ليف بوليمري من صنع الإنسان أو الطبيعة[5].

تُغزل الألياف المركَّبة من أنابيب الكربون النانوية غزلاً مستمراً، وهذا يؤدّي إلى متانة أكبر بأربع مرات من متانة حرير العنكبوت، وبـ 17 مرة من تلك التي لألياف كفلار. أما جساءة هذه الألياف ومقاومتها للشدّ فتساوي ضعف جساءة ومقاومة سلك فولاذي له الوزن والطول نفسيهما، وتساوي متانتها 20 ضعفاً من متانته.

يقول راي باوفمان (Ray Baughman)، مدير معهد التقانة النانوية في جامعة تكساس بدالاس[(4)]: «لم ينجح الجنس البشري في معالجة هذه المليارات التي لا تحصى من الألياف النانوية اللامرئية لصنع أشياء مفيدة تستغل تلك الخواص. وطريقتنا في الغزل هي الأولى التي تُنتِج أليافاً مستمرة عالية الجودة من أنابيب كربون نانوية ملائمة للاستخدام في طيف واسع من التطبيقات المتنوعة».

ومن التطبيقات الممكنة لألياف جامعة تكساس ملابس تستطيع خزن طاقة كهربائية يمكن أن تُستخدم لتزويد تجهيزات كهربائية مختلفة بالطاقة، أو عضلات صناعية أقوى بمئة مرة من العضلات الطبيعية التي لها القطر نفسه. ويمكن استخدام هذه الألياف أيضاً بوصفها مصدر طاقة لمرْكَبات الفضاء التي تذهب في رحلات طويلة، وذلك من خلال تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية، أو «للمرْكَبات الجوية الميكرويّة» التي من حجم الحشرات والتي يمكن أن تحل محل الطائرات العسكرية المسيَّرة الكبيرة في جمع المعلومات الاستخبارية من بُعد.

طوَّر الكيميائيون في جامعة ديوك طريقة لتنمية أنابيب كربون نانوية سماكتها ذرّة واحدة، وأطول بمئة مرة من المعتاد، مع الحفاظ على الاستقامة، وتوجيه متحكَّم به. يزيل هذا الإنجاز عقبة رئيسة تقف بوجه استخدام الأنابيب النانوية في التجهيزات «الإلكترونية

النانوية» الشديدة الصغر. وطوّر أولئك الباحثون أيضاً شبكات من الأنابيب مشابهة لرقعة الشطرنج يمكن أن تمثّل أساساً لتجهيزات إلكترونية نانوية.

لقد تضمّن هذا العمل استنبات بُنى رقيقة جداً من الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار، من مجموعة ضئيلة من محفِّز تفاعل من ذرّات الحديد والموليبدن المرسَّبة على شكل نقاط على مستطيل صغير من السليكون ضمن أنبوب من الكوارتز. تستمر هذه الأنابيب النانوية بالاستطالة على طول سطح السليكون باتجاه تدفّق غاز تغذية من أول أُكسيد الكربون والهيدروجين سُخِّن بسرعة حتى درجة حرارة كافية لصهر الزجاج العادي. واستُخدمت ذرّات من غاز التغذية لَبِنات بناء جُزَيئية.

وصف هذه السيرورة جي ليو (Jie Liu)، أستاذ الكيمياء المساعد في جامعة ديوك، وزملاؤه في نسخة المجلة *(Journal of the American Chemical Society)*(JACS) المنشورة في الإنترنت. وادَّعى هؤلاء الباحثون في البداية تحقيق أطوال أكبر من 2 مم، إلا أنهم قاموا الآن بتنمية أنابيب نانوية طولها 4 مم، ويمكن أن يحصلوا على أنابيب أطول في المستقبل[6].

وتشكِّل تقنية أخرى أنماطاً ميكرويّة من أنابيب الكربون النانوية المصطفة بالتفكيك الكيميائي حرارياً لمعقّدات معدنية عضوية تحتوي على كل من المعدن المحفِّز ومصدر الكربون اللازم لنمو الأنبوب النانوي. وفي ما يخص تجهيزات التصنيع، يمكن تكوين الأشكال الميكرويّة للأنابيب النانوية المصطفة إما بتنمية الأنابيب وفق تلك الأشكال على سطح ذي قناع جزئي محضَّر سلفاً، أو بواسطة عملية طباعة تماسية، حيث تُنقل أغشية أنابيب نانوية من دون ركيزة إلى

ركائز أخرى، ومنها الأغشية البوليمرية التي لا يمكن إجراء التنمية عند درجات الحرارة العالية من دونها.

من المرجَّح أن ثمة آليتين مختلفتين كلياً تعملان في أثناء تنمية الأنابيب النانوية المتعدّدة الجدران والأنابيب الوحيدة الجدار، لأن وجود المحفِّز ضروري جداً لتنمية الأخيرة. وفي ما يخص الأنابيب المتعدّدة الجدران المفتوحة، يمكن أحياناً رؤيتها ضمن عيّنات الأنابيب النانوية التي تجري تنميتها بالقوس الكهربائية. وأفضل تفسير لوجودها هناك هو أنه، وفقاً لآلية ما، تبقى جميع طبقات الأنبوب التي في قيد النمو مفتوحة في أثناء التنمية[1]. أما انغلاق الطبقة، فينجم عن تنوِّي حلقات خماسية بسبب اضطرابات محلية في ظروف التنمية، أو بسبب الاستقرار الطاقي بين البُنى التي تحتوي على المسدَّسات والمخمَّسات.

تنمو طبقات خارجية متعاقبة على القوالب الأنبوبية الداخلية، وينجم اللاتناحي الكبير في الأبعاد من معدّلات النمو المختلفة كثيراً عند النهايات المفتوحة العالية الطاقة، مقارنةً بالمستويات القاعدية غير التفاعلية.

ونظراً إلى ضرورة وجود المحفّز لنمو الأنابيب النانوية الوحيد الجدار، يجب على أي آلية تحصل التنمية بموجبها أن تتضمّن دور المحفز. لكن ليس ثمة من إجماع حتى الآن على كيفية نمو الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار، ولا على سبب الزيادة الهائلة في إنتاج الأنابيب عند إضافة عنصر آخر مثل الإيتريوم، الذي لا يقوم بأي نشاط تحفيزي عند استخدامه وحده.

واكتشف الباحثون في جامعتي رايس وإلِّينوي الطريقة الأولى لانتقاء وعزل أنابيب الكربون النانوية كيميائياً اعتماداً على بنيتها الإلكترونية. أما الطريقة الجديدة، فتمثّل تغيّراً جوهرياً في طريقة تفكير العلماء بكيمياء أنابيب الكربون النانوية[7].

باستثناء تخفيض تكلفة الإنتاج الكمي للأنابيب النانوية، لا توجد عقبة يجب التغلب عليها في تقانة الكربون النانوية أكبر من إيجاد وسائل موثوقة يمكن تحمل نفقاتها لتصنيف الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار. وفي الواقع، إذا استطاعت مساعي التطوير إيجاد تقانة جديدة قائمة على التصنيف الإلكتروني، وقادرة على فصل الأنابيب النانوية الناقلة على نحو موثوق من تلك شبه الناقلة، فإن ذلك سيوفِّر أداة عظيمة إلى العلم النانوي.

ويمكن لاستخدام أنابيب كربون نانوية معيّنة، بناءً على خواصها الإلكترونية الدقيقة، أن يمثّل تقدماً هائلاً في الإلكترونيات الجُزَيئية. لقد كان على كل شخص حتى الآن أن يُنمِّي مزائج من الأنابيب النانوية، وأن ينتقي، بطريقة الاستبعاد، تلك التي تحقّق الخصائص المطلوبة من بين العدد الهائل من الخيارات المتاحة. لكن كل هذا يمكن أن يتغير الآن بسبب وجود إمكانية لصنع أنابيب متجانسة.

ليست جميع الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار المتولّدة متماثلة. فثمة 56 نوعاً منها تختلف في ما بينها بفوارق دقيقة في أقطارها وبُناها الفيزيائية. وبرغم ضآلة تلك الفوارق، فإنها يمكن أن تؤدّي إلى اختلافات واضحة في الخواص الكهربائية والبصرية والكيميائية. وعلى سبيل المثال، نحو ثلثها يكون ناقلاً، والبقية تكون نصف ناقلة.

صحيحٌ أن أنابيب الكربون النانوية كانت قد اقتُرحت لعدد كبير من التطبيقات، من المحرّكات الضئيلة والمُحِسَّات الكيميائية، حتى الدارات الإلكترونية الجُزَيئية المقاس، إلا أن استخداماتها الفعلية كانت محدودة جداً، ويعود ذلك جزئياً إلى أن العلماء قَصَروا جهودهم على فصل وتصنيف الأنابيب النانوية من الحزم المتشابكة المكوِّنة لها المنتَجة بشتى طرائق التصنيع.

لكنّ العلماء والباحثين لدى جامعتي رايس وإلينوي طوَّروا تقانة لتفكيك حزم الأنابيب النانوية ونثرها في ماء صابوني، وعالجوا سطوح الأنابيب كيميائياً لانتقاء الناقلة منها.

وللسيطرة على كيمياء الأنابيب النانوية، أضافوا أملاح الديازونيوم القابلة للانحلال في الماء إلى الأنابيب المعلقة في محلول مائي، لأن الكاشف الديازونيومي ينتزع شحنة كهربائية، ويرتبط كيميائياً بالأنابيب النانوية ضمن ظروف معيّنة متحكَّم بها.

وبإضافة مجموعة وظيفية إلى نهاية الكاشف، تمكّنوا من تكوين «قبضة» يمكنهم استخدامها لتداول الأنابيب النانوية انتقائياً. وثمة تقنيات مختلفة لتشكيل القبضات، منها التوضيع الكيميائي والتهجير الكهربائي الشعري (Capillary Electrophoresis).

تتحدَّد الخواص الإلكترونية للأنابيب النانوية ببنيتها، وهذا ما يوفِّر طريقة للإمساك بها باستخدام الفوارق بين بناها الإلكترونية. ونظراً إلى أن النواقل تعطي إلكتروناً بسرعة أكبر مما تفعله أنصاف النواقل، يمكن استخدام الكاشف الديازونيومي لفصل الأنابيب النانوية الناقلة من الأنابيب نصف الناقلة.

وتلك الكيمياء عكوسة. فبعد تداول الأنابيب النانوية تمكَّن العلماء من إزالة القبضات الكيميائية بالتسخين. واستعادت المعالجة الحرارية أيضاً البنية الإلكترونية الأصلية للأنابيب النانوية.

وقد كان ثمة إجماع في الآونة الأخيرة على أن كيمياء الأنابيب النانوية تعتمد على أقطارها فقط، حيث تكون الأنابيب الصغيرة أقل استقراراً وأشدّ تفاعلاً. لكن من الواضح أن هذا ليس صحيحاً هنا. فمسارات التفاعل تقوم على الخواص الإلكترونية للأنبوب النانوي، لا على مجرد بنيته الهندسية، وهذا يمثّل منحى جديداً في كيمياء الطَور المحلول لأنابيب الكربون النانوية.

## خواص أنابيب الكربون النانوية

يمكن لأنابيب الكربون النانوية أن تؤدّي أدواراً متعدّدة الوظائف، لأن مقاومتها للشدّ أكبر بعشر مرات على الأقل من تلك التي لألياف الكربون العادية، ووزنها أقل من نصف وزن تلك الألياف، وناقليتها الكهربائية تضاهي ناقلية النحاس، وناقليتها الحرارية تضاهي ناقلية الألماس[23](8). يُضاف إلى ذلك أن خواصها يمكن أن تُفصَّل وفق الحاجة بالمعالجة كي تلائم طيفاً واسعاً من التطبيقات الجوية والفضائية والحيوية الطبية والصناعية. إن طيف التطبيقات التي تهتم بهذه الخواص غير محدود: من المُحِسَّات الكيميائية والمواد المركَّبة الشديدة المقاومة حتى الشبكات الضئيلة التي تنقل القياسات التي تُجرى من بُعد بطريقة تحاكي الطرائق الحيوية. إن النظم الحيوية تعمل وفق مبادئ سلّم المقاسات الذريّة، واليوم، سوف يتمكن مهندسو المواد من استقصاء هذا العالم النانوي المذهل في ذلك السلّم نفسه(8).

### الخواص الميكانيكية

تتصف أنابيب الكربون النانوية بخواص ميكانيكية استثنائية. فبالمقارنة بالفولاذ مثلاً، تساوي نسبة مقاومة الأنابيب للشدّ إلى وزنها 500. وفي الوقت نفسه، يمكن استخدامها لصنع رقاقات حاسوبية، لأنها تمتلك، إلى جانب خواصها الميكانيكية الرائعة، خواص كهربائية مثيرة جداً أيضاً.

تاريخياً، لم تكن المواد التي استُخدمت لتطبيقات الرقاقات الحاسوبية ملائمة عملياً لبناء الطائرات. وينطبق هذا المثال أيضاً على الألمنيوم والفولاذ العديم الصدأ، فهما يمكن أن يُستخدما لصنع سيارة مثلاً، لكن لم يمكن استخدامهما أبداً في صنع رقاقات حاسوبية. أما أنابيب الكربون النانوية، فيمكن أن تُستخدم في

التطبيقات الدقيقة كالرقاقات الحاسوبية والمُحِسَّات، وفي التطبيقات الكتلية الكبيرة في الصناعة الجوية والفضائية، وفي صناعة السيارات.

ويحسِّن انعدام العيوب في الأنابيب خواصها الميكانيكية، ويزيد من إمكان استخدامها مقويات إنشائية. وتتكوَّن الروابط في الأنابيب النانوية من ذرّات الكربون المترابطة تشاركياً مع أقرب ثلاث ذرّات مجاورة. وتكون نهايات الأنابيب مسدودة، من دون أي روابط كيميائية متدلية يمكن أن تُضعف التشكيلة. وبنية الأنابيب الخفيفة الوزن مجمَّعة على شكل ليف كربون مثالي له أقوى الروابط الموجودة في الطبيعة. أما القوة الرابطة بين ذرّات الكربون، والمرونة العالية للأنابيب، مقارنةً بتلك التي لألياف الغرافيت، تجعلانها شديدة المقاومة للتلف الناجم عن الانفعال. يقول ريتشارد سمولِّي (Richard Smalley): «إنه أقوى ليف يمكن صنعه من أي شيء، على الإطلاق. وفي مراهنات نسبة القوة إلى الوزن، فإنه يُعتبر الليفَ الذي لا نظير له»[22].

من المعروف أن مقاومة أنابيب الكربون النانوية للشدّ تتراوح بين 50 و200 جيغا باسكال، وهذه قيمة أكبر بعشر مرات على الأقل من تلك التي لألياف الغرافيت العادية. يُضاف إلى ذلك أن توقّعات المرونة العالية والجساءة إزاء الحَنِي الكبيرة التي تؤكّدها قياسات مطال الاهتزاز الحراري تعطي مُعَامل يونغ يزيد على 1 تِرًّا باسكال. كذلك يُتوقَّع أن تنكسر الأنابيب النانوية عند انفعال كبير جداً (20 ـ 5 في المئة). وقد وُجد في المحاكاة الديناميكية للأنابيب النانوية أنها تشابه «الأوتار الفائقة»، وهي تتضيَّق حتى تصبح سلاسل كربون منفردة حين شدها[2](انظر الجدولين 7 ـ 1 و7 ـ 2)[24].

## خواص المواد المركَّبة المقوّاة بالأنابيب النانوية

إن مُعَامل يونغ والانفعال المرن الكبيرين يجعلان الأنابيب النانوية ملائمة لتكون مقوّيات للمواد المركَّبة. تعمل الصدوع

الميكرويّة في الأجسام المستمرة الصلبة مركِّزات للإجهاد، أما في المواد المركَّبة المقوَّاة بالأنابيب النانوية الضعيفة الترابط، فإن تلف ليف واحد يؤدّي إلى تحميل قليل جداً للأنابيب المجاورة، ولذا يتوقف نمو الصدع. وفي المحصِّلة، تنتقل الأحمال إلى الأنابيب النانوية، مؤدّيةً إلى مُعَامل يونغ في المادة المركَّبة مشابه لذاك الذي لمادة مركَّبة متناحية ذات ألياف قصيرة تحتوي على ألياف استثنائية في مُعَامل ومقاومة الشدّ.

وتولِّد المساحة السطحية الكبيرة للأنابيب النانوية (مقارنةً بتلك التي لألياف الغرافيت) منطقة ملتقى كبيرة يمكن أن تكون لها خواص مختلفة عن تلك التي للحاضنة الكبيرة. لقد كانت الملتقيات دائماً مهمة في المواد المركَّبة، إلا أنها كثيرة في المواد المركَّبة ذات الأنابيب النانوية، إلى حد أنها تهيمن على سلوك المادة الكتلية.

ويتجلى الدليل على التفاعل الشديد بين الحاضنة والألياف في سطح الكسر الذي يُظهر الأنابيب النانوية المنتشرة في البوليمر الحراري التصليد. فانتشار الأنابيب النانوية واضح في السلّم الميكروي، حيث ينتقل بعض الحمل بين الحاضنة والمقوي. وإحدى طرائق زيادة انتقال الحمل هي تعليق جُزَيئات في نهايات أو جوانب الأنابيب النانوية لتحقيق ربط أفضل. إن زرع الوظائف في المستوى الجُزَيئي يوفِّر مستوى جديداً من إمكانات تصميم المواد المركَّبة، يتجاوز الطرائق الشائعة لزيادة الالتصاق في الملتقيات. إن كيفية تأثير إضافة مجموعات وظيفية معيّنة في القوة الميكانيكية للأنابيب غير معروفة حالياً، إلا أن الخواص الميكانيكية الاستثنائية المعروفة للأنابيب النانوية تجعل من تطوير مواد مركَّبة ذات مقاومة شدّ كبيرة هدفاً يستحق العناء، برغم أن تحقيقه سوف يكون شديد الصعوبة[(2)(1)].

**الجدول 7 ـ 1**: قيم مقاومة أنابيب الكربون النانوية للشد ومعامل يونغ الخاص بها[24].

| الخاصية | المادة | النوع | القيمة | الواحدة | المجال | محاكاة | مقاسة | التقنية | جهاز القياس | المرجع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقاومة الضغط | متعددة الجدران | | 150 | جيغا باسكال | | | × | | | 31 |
| معامل يونغ الكتلي | وحيدة الجدار | | 0,191 | ترا باسكال | 0,19–0,192 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| معامل يونغ الكتلي | وحيدة الجدار | حبال | 0,022 | ترا باسكال | 0,015–0,033 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| معامل يونغ الكتلي | متعددة الجدران | | 0,194 | ترا باسكال | 0,19–0,194 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| ثابت أويلر النابضي | | | | | 1,6–4,0 | × | | الديناميك الميكانيكي Cerrius - | | 36 |
| نسبة بواسان | متعددة الجدران | | 0,269 | | 0,269–0,280 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| نسبة بواسان | وحيدة الجدار | | 0,16 | | 0,436–0,541 | × | | قوة ثابتة | | 30 |
| معامل القص | متعددة الجدران | | 0,48 | ترا باسكال | 0,463–0,478 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| معامل القص | وحيدة الجدار | | 0,45 | ترا باسكال | | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| انفعال الانقطاع | متعددة الجدران | الطبقة الخارجية | 0,12 | | | | × | مجهر المسح الإلكتروني | مجهر المسح الإلكتروني مع مرحلة تحميل | 37 |
| انفعال الانقطاع | متعددة الجدران | في غشاء بوليمر | 0,075 | | | | × | اختبار الشد | Instron | 31 |
| انفعال الانقطاع | وحيدة الجدار | الانفعال الأقصى عند معدلات انفعال مختلفة | | | ٪28–35 | × | | الديناميك الميكانيكي | | 42 |

**الجدول 7-2**: قيم مقاومة أنابيب الكربون النانوية للشد ومعامل يونغ الخاص بها[24].

| الخاصية | المادة | النوع | القيمة | الواحدة | المجال | محاكاة | مقاسة | التقنية | جهاز القياس | المرجع |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| مقاومة الشد | متعددة الجدران | طبقة خارجية | 32.8 | جيغا باسكال | 63-20 | | × | مجهر المسح الإلكتروني | مجهر المسح الإلكتروني مع مرحلة تحميل | 37 |
| مقاومة الحني | متعددة الجدران | | 14.2 | جيغا باسكال | 22-6 | | × | مجهر القوة الذرية | مجهر القوة الذرية مع حني | 35 |
| مقاومة القص | | ملتقيات بوليمر-أنابيب نانوية | 500 | ميغا باسكال | | × | | نموذج قطعة ليف واحد | | 31 |
| معامل يونغ | متعددة الجدران | أنبوب كامل | | جيغا باسكال | 68-18 | | × | مجهر المسح الإلكتروني | مجهر المسح الإلكتروني مع مرحلة تحميل | 37 |
| معامل يونغ | متعددة الجدران | طبقة خارجية | | جيغا باسكال | 950-270 | | × | المسح الإلكتروني | مجهر المسح الإلكتروني مع مرحلة تحميل | 37 |
| معامل يونغ | متعددة الجدران | في غشاء بوليمر | 2 | جيغا باسكال | | | × | اختبار الشد | Instron | 31 |
| معامل يونغ | وحيدة الجدار | | | | 1.4-3 | × | | ميكانيك | | 33 |
| معامل يونغ | وحيدة الجدار | مادة ألماسية | | | 1.3-1.28 | × | | ميكانيك | | 33 |
| معامل يونغ | وحيدة الجدار | تابع للشكل الهندسي | | | 1.2-0.971 | × | | الديناميك الميكانيكي-Cerrius | | 36 |
| معامل يونغ | وحيدة الجدار | | 0.974 | ترا باسكال | 0.975-0.971 | × | | قوة ثابتة | | 32 |
| معامل يونغ | وحيدة الجدار | حبال | 0.56 | ترا باسكال | 0.795-0.43 | × | | قوة ثابتة | | 32 |

### الخواص الكهربائية

إن أكثر خواص الأنابيب النانوية إثارة هي تلك المتعلقة ببنية نطاقها الإلكتروني (Electronic Band Structure). وقد بيَّنت حسابات أولية أن الأنابيب النانوية يمكن أن تكون ناقلة، أو نصف ناقلة، بناءً على حلزونيتها ومقاسات أقطارها. والأنابيب التي لها شكل الكرسي، هي ناقلة دائماً، في حين أن الأنابيب المتعرجة (الزكزاكية) اللاانطباقية يمكن أن تكون ناقلة أو نصف ناقلة. لقد كانت هذه التوقّعات القوة المحرّكة الرئيسة للتطوُّر في هذا الحقل، إلا أن التحقُّق من بعض هذه التوقّعات تجريبياً لم يحصل إلا أخيراً[1].

وتتصف الأنابيب النانوية أيضاً بخواص كهربائية فريدة تعتمد على بنيتها. فاعتماداً على طريقة توجُّه السلاسل السداسية بالنسبة إلى محور الأنبوب (اللاانطباقية)، فإنها يمكن أن تعمل نواقل أو أنصاف نواقل. ومن المعروف أيضاً أن لاانطباقية الأنابيب تؤثّر في خواصها الميكانيكية، وهي نقطة مهمة في بحوث المواد المركَّبة[1].

يؤدّي تجميع الأنابيب النانوية بنيوياً على هذا النحو إلى تهجين للروابط الإلكترونية يختلف عن ذاك الموجود في الألماس والغرافيت. تكوِّن ثلاثة إلكترونات، من إلكترونات التكافؤ الأربعة التي في ذرّات الكربون، روابط في المستوي، تاركة الإلكترونات الحرة تتحرك في اتجاه واحد على طول الأنبوب، بدلاً من التحرُّك في مستوي الغرافين (Graphene). ويُتوقَّع حصول زيادة كبيرة في كثافة الإلكترونات الحرة في حزمة متوازية من الأنابيب النانوية، وهذا يؤدّي إلى ناقلية تضاهي ناقلية المعادن الجيدة. وقد بيَّنت قياسات أخيرة، لناقلية الأنابيب النانوية الناقلة، زيادةً في الناقلية على شكل درجات مع زيادة الجهد الكهربائي. وهذا يشير إلى سلوك كمومي، ويبيّن أن الأنابيب النانوية يمكن أن تكون أسلاكاً جُزَيئية في تجهيزات

تنافس الترانزستورات ومُصدِرات الإلكترونات الحقلية ومواد التفريغ الكهروساكن. إن التقدم باتجاه الإلكترونيات الجُزَيئية جلي من خلال العروض الأخيرة للثنائيات وترانزستورات المفعول الحقلي القائمة على الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار[1].

أكثر من هذا، لوحظ أن الإشابة بعناصر من قبيل البوتاسيوم والبروم تمكِّن من التحكُّم بالخصائص الكهربائية للأنابيب النانوية. واستخدام الأنابيب النانوية في الشاشات المسطحة والإضاءة التجارية قد يصبح ممكناً بعد العروض الأخيرة لخواصها المتعلقة بالإصدار الإلكتروني الحقلي ضمن الظروف المحيطة.

وتُعتبر الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار نظاماً محدَّداً تماماً من حيث خواصها الإلكترونية. فالعيّنات الاختبارية التي تم الحصول عليها من قوس كهربائية، أو بالحتّ الليزري ضمن ظروف مثالية، تتألف من أنابيب نانوية متجانسة الأقطار يتصف معظمها بمجال ضيق من الحلزونية (حول تشكيلة الكرسي).

وتشكِّل الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار شبكة من الحُزَم المتماسكة معاً بقوى فان در فالس. وقد دُرست هذه الحزم أيضاً من حيث اعتماد مقاومتها الكهربائية على درجة الحرارة. عند درجات الحرارة العليا، لوحظ فيها سلوك معدني حقيقي (تزداد المقاومة الكهربائية بازدياد درجات الحرارة)، إلا أن ثمة قيمة دنيا للمقاومة تعود عندها إلى التزايد عند درجات الحرارة المنخفضة (تزداد المقاومة بنقصان درجات الحرارة). والسبب الحقيقي لهذا السلوك غير معروف[1].

### الخواص الحرارية

تؤثّر رَفاعة الأنابيب النانوية كثيراً في ناقليتها الحرارية في كل من الاتجاهين العرضاني والموازي للمحور. ونظراً إلى أن الأنبوب

مبني من صفيحة غرافيت إفرادية ملتفة، فقد وُجد بالقياس أن الناقلية الحرارية على طول الصفيحة تساوي تقريباً تلك التي للألماس (أشد المواد نقلاً للحرارة). وتتصف هذه الأنابيب الوحيدة البعد بنسب بُعدية كبيرة جداً (طول/ قطر)، ويُتوقَّع أن ينتقل معظم الحرارة على طول محاورها. لذا يمكن تحضير مواد ذات ناقلية حرارية شديدة اللاتناحي بالصف الملائم لتلك الأنابيب. صحيحٌ أن النقل الحراري للأنابيب النانوية في الاتجاه المحوري يضاهي ذاك الذي لأفضل النواقل الحرارية، إلا أنّ معدّل النقل الحراري في الاتجاه العرضاني أقل كثيراً.

## الخواص الأخرى

حظيت الخواص الإلكترونية والميكانيكية للأنابيب النانوية حتى الآن بأقصى اهتمام، لكن ثمة خصائص أخرى تجعل الأنابيب النانوية مهمة أيضاً. فبنية الأنابيب الجوفاء تجعلها خفيفة جداً (تتغيّر الكثافة من نحو 0.8 غ/ سم$^3$ للأنابيب الوحيدة الجدار، حتى 1.8 غ/ سم$^3$ للأنابيب المتعدّدة الجدران، في حين أن كثافة الغرافيت تساوي 2.26 غ/ سم$^3$)، وهذه خاصية مفيدة جداً لكثير من التطبيقات، من المواد المركَّبة حتى خلايا الوقود. ومقاومة الشدّ النوعية (المقاومة/ الكثافة) مهمة أيضاً في تصميم المواد الإنشائية. تزيد مقاومة الشدّ النوعية في الأنابيب النانوية بأكثر من مرتَبَتَيْ كِبَر على تلك التي للفولاذ. بالمقارنة، مقاومة الشدّ النوعية للألياف الكربونية تساوي 40 ضعفاً من تلك التي للفولاذ. وفي حين أن الأنابيب النانوية تُصنع من كربون غرافيتي، فإنها تتصف بمقاومة جيدة للهجوم الكيميائي، وباستقرار حراري عالٍ. وبيَّنت دراسات الأكسدة، أن بدء الأكسدة ينزاح بنحو 100 مْ نحو الأعلى في الأنابيب النانوية، مقارنةً بألياف الغرافيت ذات معامل يونغ الكبير. تبدأ الأكسدة في الأنابيب النانوية عند شفتي

الأنبوب، وهذا يؤدّي إلى إمكان فتح الأنابيب النانوية بالأكسدة[1]. وفي الخلاء، أو في أجواء مُرجِعة، تكون بُنى الأنابيب مستقرة عند أي درجة حرارة عمل واقعية.

ووفقاً لما ذُكر سابقاً، يُعتبر انتقال الإلكترونات في الأنابيب النانوية فريداً، فالأنابيب شديدة الناقلية الكهربائية في الاتجاه المحوري. كذلك فإن الناقلية الحرارية فيها شديدة في الاتجاه المحوري، وقيمتها قريبة من قيمة تلك التي للغرافيت في المستوي (وهو من أشدّ المواد نقلاً للحرارة)[10]. لقد أُجريت اختبارات للتحقُّق من الناقلية الحرارية للمواد المصنوعة من أنابيب نانوية. وفي حالة المواد المركَّبة، وبرغم أن النسبة البعدية الكبيرة للأنابيب النانوية تساعد على تحسين الناقلية الحرارية، إلا أن ملتقيات الأنابيب النانوية والحاضنة يمكن أن تكون كابحة، ويتعزَّز هذا الكبح بالمساحة السطحية الكبيرة المتاحة لتكوين الملتقيات.

## تفصيل الخواص

يمكن للأنابيب النانوية، أي تلك الجُزَيئات الوترية الفائقة المُستخدمة في تصنيع خلايا الوقود والدارات الحاسوبية الضئيلة، أن تُستخدم في تطبيقات جديدة كثيرة، تمتد من معالجة الأمراض حتى صناعة اللّدائن ووسائط خزن المعلومات، وفق ما يقوله فريق البحث لدى جامعة بِردو[25].

قام فريق البحث، الذي يقوده فِنّيري (Fenniri)، بتكوين أجناس متعدّدة من أنابيب نانوية تمتلك خواص فيزيائية وكيميائية لا سابق لها، يمكن لكل منها أن يؤدّي إلى تطبيق صناعي مختلف. والشيء الذي لا سابق له أيضاً هو التحكُّم التام لفريق العمل بتكوين الأنابيب

النانوية الذي سمح عملياً «بتفصيل» الخواص المرغوب في أن تتصف الأنابيب بها. يمكن لهذه الاكتشافات أن توسِّع كثيراً أنواع المواد المتاحة للاستخدام في السلّم النانوي.

يقول فِنِّيري: «بدلاً من أن تكون محدوداً بلَبِنات بناء من حجم أو شكل أو لون واحد، فإن لديك الآن مخزناً من الأنواع المختلفة. ويمكن لهذا البحث أن يوفِّر للعامل في التقانة النانوية مقداراً كبيراً من المواد الإضافية الجديدة».

وبدلاً من العمل بالكربون أو المعادن، كما فعلت مجموعات أخرى، كوَّن فريق فِنِّيري أنابيب نانوية من جُزَيئات عضوية صناعية. وبرغم أن المواد الأخرى تتصف بمزايا كثيرة، فإن معالجتها ليست بسهولة معالجة المواد التي استخدمها فريق فِنِّيري. يقول فِنِّيري، الأستاذ في جامعة بِردو: «باستخدام الكيمياء التركيبية، سيطر الفريق كلّياً على تكوين الأنابيب النانوية، والسيطرة الشديدة في المخبر تعني مزيداً من الخيارات للصناعة».

وإحدى طرائق استغلال الأنابيب النانوية هي استخدامها منصات لمواد أخرى. تبدو الأنابيب النانوية مثل كُدسة من الحلقات اللولبية الشكل، وكل حلقة تتألف من ستة جُزَيئات لها شكل فطيرة مضلّعة المحيط. وتعلِّق جُزَيئات أخرى نفسها على الحلقة متدلية من الأنبوب كتدلي الخرز من سوار. بذلك تعطي الجُزَيئات المعلّقة خواصها إلى السطح الخارجي للأنبوب النانوي. على سبيل المثال، إذا كانت الجُزَيئات المكوِّنة للنايلون هي التي تعلَّقت بالأنابيب النانوية، أمكن حينئذٍ تحويل الأنابيب إلى ألياف طويلة مرنة جداً، وقوية جداً أيضاً. أي إنه يمكن جعلها نوعاً محسَّناً من النايلون ذي الاستخدامات التي تفوق كثيراً مجرّد جعل جواربك تمتط. يمكن استخدام هذه الألياف لتقوية أي شيء، من هياكل القوارب إلى الستر الواقية من الرصاص، إلى مظلات الهبوط من الجو.

وثمة سرٌّ آخر لصنع أنابيب نانوية ذات خواص منتقاة، يكمن في استغلال خاصية اللاانطباقية ذات الصلة بالاتجاه الذي تلتوي فيه الأنابيب اللولبية. تلوي الطبيعة الجُزَيئات في اتجاه واحد فقط، وهذا هو سبب التواء الدَنا دائماً نحو اليمين ووصفها بأنها يمينية اللاانطباق. إلا أنه يمكن جعل الأنابيب النانوية تلتوي في أحد الاتجاهين أو الآخر، وهذا ما يمكِّن من صنع أنابيب نانوية يسارية ذات قدرات غالباً ما لا تمتلكها نظيراتها اليمينية.

حينئذٍ، يمكن صنع أنبوبين نانويين من المادة نفسها يتصرفان على نحو مختلف. فعلى غرار لعبة إنزال القطع ذات الأشكال المختلفة في أمكنتها على لوحة محفورة وفق تلك الأشكال، حيث لا يمكن إنزال قطعة مقلوبة في مكانها، يمكن جعل الأنبوب النانوي اليساري يتفاعل مع مواد مختلفة عن تلك التي يتفاعل معها الأنبوب اليميني.

وأثناء إجراء فِنِّيري تجارب لتحديد خواص الأنابيب النانوية، اكتشف نوعاً من السلوك غير المتوقَّع في أنابيبه. فالأنابيب النانوية تعزِّز تكوُّنها ذاتياً، وهذا سلوك تتميز به النظم الحية من حيث التكاثر والتكيّف مع المحيط. يمكنك تخيُّل تكوُّن نوع من الأنابيب عند 25 مْ، وتكوُّن نوع آخر بخواص فيزيائية وكيميائية مختلفة جداً عند 70مْ.

وتُظهر هذه المبادئ المكتشفة حديثاً السهولة النسبية للتحكّم بخواص الأنابيب النانوية، وتجعل كثيراً من التطبيقات الجديدة ممكناً. ويمكن للمرء أن ينظر بتفاؤل إلى إمكان استخدام الأنابيب النانوية في معالجة الأمراض.

إن كثيراً من الأدوية يقتل الجراثيم بفتح ثقوب في أغشية خلاياها تتسرب منها أغذيتها، تماماً على غرار ثقب بالون. ويمكن لهذه الأنابيب النانوية أن تفعل الشيء نفسه، وتستطيع، إضافة إلى

ذلك، خداع الجراثيم بواسطة شِراك تقودها إلى أغشية خلاياها حيث تبدأ بتدميرها.

ويمكن لمزيد من استغلال تفصيل خواص الأنابيب النانوية أن يؤدّي إلى أنابيب نانوية تنقل الكهرباء أو الفوتونات، وهذا ما يجعلها مفيدة في نظم الذواكر الحاسوبية، والشاشات الشديدة الوضوح، والمُحِسَّات الحيوية، ونظم التزويد بالدواء.

## مواد أخرى للأنابيب النانوية

تُعتبر أنابيب التيتانيا (أُكسيد التيتانيوم) النانوية أشدّ حساسية بـ 1500 مرة من ثاني أفضل مادة لكشف غاز الهيدروجين، وقد تكون واحدة من الأمثلة الأولى للمواد التي تتغيَّر خواصها كثيراً حين إرجاعها إلى السلّم النانوي، وفق قول الباحثين في جامعة بنسلفانيا الحكومية[26].

ينساب الهيدروجين الذي يدخل صفيفة من أنابيب التيتانيا النانوية حول جميع سطوح الأنابيب، لكنه ينشطر أيضاً إلى ذرتَي هيدروجين منفردتين تخترقان السطوح. وتوفّر ذرّات الهيدروجين هذه إلكترونات تزيد من الناقلية الكهربائية، وهذا ما يؤشِّر إلى زيادة في مقدار الهيدروجين الموجود .

ووفقاً لقول الباحثين[26]، يمكن صنع أنابيب التيتانيا «بالأميال»، وهي رخيصة جداً وحسّاسة. يُضاف إلى ذلك أنه يمكنك استخدام المادة على نحو متكرر، لأنها تستعيد حساسيتها بعد تنظيف الأنابيب من الغاز. أما أقطار الأنابيب فتساوي 22 و76 نم.

يقول كريغ غريمس (Craig Grimes)، الأستاذ في جامعة

بنسلفانيا: «تأتي الحساسية من البنيان النانوي، لا من منطقة السطح». تختلف المساحة السطحية لنوعي الأنابيب بعامل يساوي 2، إلا أن الأنابيب التي تساوي أقطارها 22 نم أشدّ حساسيةً بـ 200 مرة من تلك التي أقطارها 76 نم.

ويرى الباحثون أن جُزَيئات الهيدروجين تتفكَّك عند سطح التيتانيا، وهذا ما يجعل الأنابيب النانوية حسَّاسة للهيدروجين. إنها تستطيع تحسُّس مستويات للهيدروجين التي تقع بين 1 و4 أجزاء من المليون جزء. تُستخدم مُحِسَّات الهيدروجين لمراقبة الجودة الصناعية في مصانع الأغذية، وأسلحةً في مواجهة الإرهابيين، ولمراقبة التلوث في نظم الاحتراق في السيارات.

وبنى باحثون[27] نوعاً جديداً من الأنابيب النانوية من الذهب والفضة، إضافة إلى جُسيْمات نانوية أخرى. تتصف هذه الأنابيب بخواص كهربائية وبصرية فريدة، وفقاً لمكوِّناتها، وبذلك تكوِّن قاعدة لمحِسَّات نانوية، ومحفِّزات تفاعل، ومختبرات كيميائية على رقاقة.

يتصف الأنبوب الناتج بالمسامية وبالمساحة السطحية الكبيرة، وبخواص بصرية وناقلية كهربائية مميزة. ويمكن لخواص تلك الأنابيب الاستثنائية بمجملها أن تمكِّن من تصميم محِسَّات ومحفِّزات تفاعل مستقبلية (وكلاهما يتطلب مساحة سطحية كبيرة)، إضافة إلى سوائليات ميكرويّة (Microfluidics)، ونظم كيميائية على رقاقة لاستخدامها في التقانة الحيوية، ومنها رقاقات الدَنا (DNA) (التي تُستخدم لكشف الطفرات الجينية وتقييم أداء الأدوية).

ونجح أولئك الباحثون في صنع أنابيب نانوية معدنية ومركَّبة متنوعة، استُخدم فيها الذهب والفضة وخليطة الذهب والبالاديوم،

إضافة إلى أنابيب ذهب مطلية بالنحاس. لكن الأنابيب الجديدة تفتقر إلى مقاومة الشدّ الميكانيكية التي تتصف بها أنابيب الكربون النانوية. أما مزاياها فتكمن في استخدامها للجُسيْمات النانوية لَبِنات بناء تجعل من الممكن تفصيل خواص الأنبوب لتتوافق مع التطبيقات المختلفة. ويمكن تغيير الخواص باختيار أنواع مختلفة من الجُسيْمات النانوية، أو حتى مزيج منها، وبذلك تَنتُج أنابيب مركَّبة. يُضاف إلى ذلك أن لَبِنات البناء المكوّنة من جُسيْمات نانوية يمكن أن تعمل منصّات لمختلف المُضافات، ومنها المواد الناقلة وأنصاف الناقلة والبوليمرية، وهذا ما يوسِّع من الخواص المتاحة.

تُنتَج هذه الأنابيب عند درجة حرارة الغرفة، وهذا إنجاز غير مسبوق، في سيرورة من ثلاث خطوات. يبدأ العلماء بقالب من $Al_2O_3$ نانوي المسامات، ويعدِّلونه كيميائياً لجعله يرتبط عملياً مع جُسيْمات نانوية من الذهب أو الفضة. وحين سكب محلول يحتوي على جُسيْمات نانوية (قطر كل منها 14 نم) فيها، فإنها ترتبط بكل من غشاء الـ $Al_2O_3$ وبنفسها، مولِّدة أنابيب نانوية متعدّدة الطبقات في مسامات الغشاء. وفي الخطوة الثالثة، يُذاب غشاء الـ $Al_2O_3$ مخلّفاً تجمّعاً من الأنابيب النانوية الصلبة المستقلة.

وفي اليابان، استخدم علماء وكالة تقانة وعلم المواد اللاعضوية (Inorganic Materials of the Science and Technology Agency) لدى معهد البحوث الوطني[28] تقنية جديدة تقوم على التسخين بالحزمة الليزرية، تحت ضغط عالٍ في خلية سندان ألماسية، لتحضير نوع جديد كلّياً من أنابيب نيتريد البورون النانوية، ونجحوا في تحليل بنية الأنبوب النانوي وعناصره المكوّنة له باستخدام مجهر تحليل إلكتروني[28].

استُخدمت خلية السندان الألماسية التي طوَّرها معهد البحوث

نفسه، وسُخِّنت فيها أطباق أحادية البَلورة (سماكاتها تساوي نحو 10 ميكرون)، تتألف من بلّورات مكّعبة ومسدّسة من نيتريد البورون. أما وسط الضغط فكان غاز النيتروجين، وكان مقدار الضغط المطبَّق ضمن المجال 15 ـ 5 جيغا باسكال. واستُخدم ليزر $CO_2$ بقدرة مقدارها 240 واط لتسخين العيّنات حتى درجة تزيد على 3000 مْ. وانصهرت عيّنات نيتريد البورون، أو تصعّدت من دون أن تنصهر في ظروف الضغط والحرارة العاليين. وكان ضمن نواتج التفاعل كميات صغيرة من الأنابيب النانوية. وقد تبيَّن من خلال التكبير الشديد (000 400 - 1000000 مرة)، والتحليل أن تلك الجُسيْمات الفائقة النعومة تمتلك أقطاراً مساوية لقطر حزمة الليزر.

تكوَّنت الأنابيب النانوية تلك من ست طبقات من الأسطوانات المتمركزة، وكان قطر الأنبوب نحو 8.5 نم، وكان طوله نحو 40 نم. وكانت المسافة بين الأسطوانات المتمركزة نحو 34 نم، ولم تكن نهايتا الأنبوب مفتوحتين، بل مغلقتين بزاوية تساوي نحو 120 درجة. ووفَّر غياب بعض أجزاء كثافة طاقة الإلكترونات الطيفية معلومات عن عناصر العيّنات وحالة ارتباطها، واكتُشف أن الأنابيب النانوية تكوّنت من عنصرَي البورون والنيتروجين، من دون أي شوائب معدنية. وبيَّنت البنية الدقيقة للطيف أن أنابيب نيتريد البورون النانوية تمتلك بنية بلّورية شبيهة بالغرافيتية. وباستخدام أحدث طرائق التحليل البنيوي، أدّت هذه التقانة إلى الاكتشاف الناجح لهذا النوع الجديد من أنابيب نيتريد البورون النانوية المكوَّنة من بورون ونيتروجين نقيين بنسبة 1 : 1.

وثمة أنابيب كربون نانوية وحيدة الجدار مغلّفة بصفيحة خارجية من نيتريد البورون قيد التطوير لدى مختبرات لورانس بيركلي الوطنية (Lawrance Berkeley National Laboratory) في كاليفورنيا[29]. يَنتُج

سلك الأنبوب النانوي عندما تغلّف أسطوانة نيتريد البورون بكرات بَكِّي، ثم تعرَّض إلى الرشق بشحنة كهربائية مدة 10 دقائق بواسطة حزمة إلكترونات كثيفة. وتكون النتيجة سلكاً كربونياً نانوياً ناقلاً مغلّفاً بليف نيتريد البورون العازل.

يقول الفيزيائي الدكتور ألكس زِتّل (Alex Zettl): «يمنع العازل الأسلاك من التماس كهربائياً معاً، أو مع نواقل مجاورة، ويسمح للأسلاك أن تكون أساساً لكابلات محورية، أو بوابة بسيطة لصنع تجهيزات إلكترونية نانوية كالترانزستورات».

صنع زِتّل ومجموعته أنابيب نيتريد البورون النانوية باستخدام تقنية قوس بلازمية تُرسل فيها شحنة كهربائية ساخنة بين قطبين غنيين بالبورون في حجرة مملوءة بغاز النيتروجين النقي. وهذا يعطي وفرة من أنابيب نيتريد البورون النانوية ضمن الهباب المتراكم على جدران الحجرة.

ويُعالج الهباب بعدئذٍ حرارياً لفتح نهايات الأنابيب، فتَنتُج أسطوانات من نيتريد البورون تسمّى الصوامع (Silos). وتوضَع الصوامع مع كرات بَكِّي في قارورة كوارتزية مخلّاة من الهواء مع مسحوق الكربون 60، ثم تُسخَّن القارورة حتى درجة حرارة بين 550 و630 مْ مدة 48 ـ 24 ساعة.

يُحدِّد القطر الداخلي لأنبوب نيتريد البورون النانوي تشكيلة كرات بَكِّي الكربونية التي تتكوَّن في الداخل. عندما يكون قطر الأنبوب 2 نم، فإن كرات الكربون 60 الإفرادية تدخل بصعوبة ضمن أسطوانات نيتريد البورون، مكوِّنة تشكيلة غير متجانسة الشكل، وعندما يكون القطر 2.8 نم، تتجمَّع كرات بَكِّي على شكل مثلثات دوّارة، وعندما يكون القطر 3.3 نم، تأخذ كرات بَكِّي السلكية النانوية شكلاً لولبياً.

ويمكن لأسطوانات نيتريد البورون النانوية أن تعمل أيضاً كنظم نمذجة لدراسة الخواص الميكانيكية والإلكترونية والحرارية والمغنطيسية للتشكيلات «المقيَّدة الأبعاد» المكوَّنة من الجُزَيئات المرصوصة بشدّة. إن نظم النمذجة تلك مهمة جداً لتطوير التقانة النانوية.

وبدلاً من استخدام الكربون النقي، يمكن الآن صنع الأنابيب النانوية من مادة الدَنا. فقد استخدم الباحثون لدى جامعة بِردو[30] صيغاً صناعية من الغوانين (Guanine) والسيتوسين (Cytosine) في إنتاج أنابيب نانوية عضوية أسهل صنعاً من نظيراتها الكربونية، وتتصف بطيف واسع من الخواص التي يمكن التحكُّم بها بتلبيس الأنابيب النانوية بجُزَيئات معيّنة.

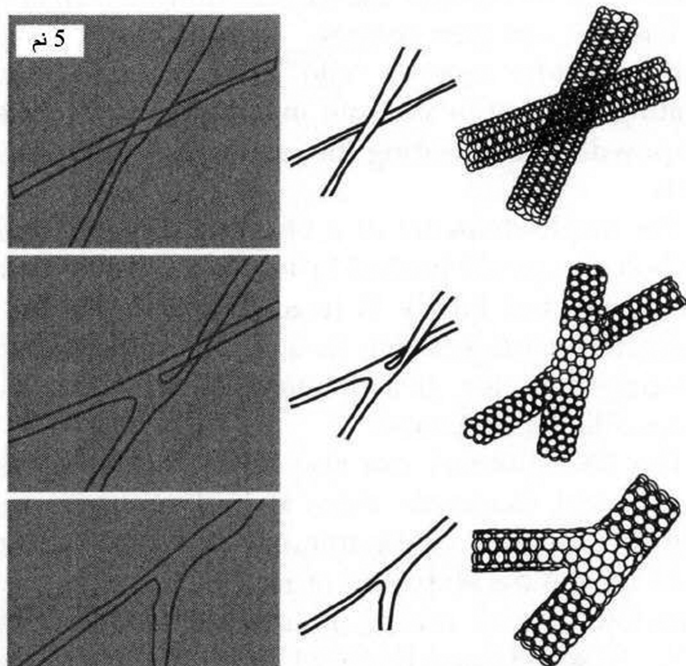
## لحام الأنابيب النانوية

لقد اكتشف العلماء كيفية لحام أنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار معاً، وهي أسطوانات كربون نقي ذات خواص إلكترونية جيدة يمكن أن تمهد الطريق للتصنيع المتحكّم به للدارات الجُزَيئية وشبكات الأنابيب النانوية. وهذه أول مرة تُلحم فيها أسلاك نانوية كربونية وحيدة الجدار، مع أنه كان قد جرى سابقاً صنع أنابيب متعدّدة الجدران ذات وصلات باستخدام تقنيات التنمية. إن الخواص الكهربائية للأنابيب النانوية الوحيدة الجدار تفوق تلك التي للمتعدّدة الجدران، ولذا كان كثير من الباحثين توّاقاً لإجراء هذه التجربة، وفق قول بوليكل آجايان (Pulickel Ajayan)، أستاذ علم المواد في معهد رنسِّلير للتقانة (Rensselaer Polytechnic Institute) بنيويورك[31][32].

يقول آجايان: «لم يعرف أحد إن كان من الممكن صنع الوصلة. إن أنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار ذات شكل

أسطواني مثالي خالٍ من العيوب، ومن أجل إيجاد وصلات بينها، يجب أن تتشكّل روابط كربون ـ كربون بين الأنابيب. وسيرورتا التشعيع والتسخين اللتان نستخدمهما تولدان من العيوب ما يكفي لتكوين هذه الروابط، من دون إيذاء الخواص الكهربائية للأنابيب».

استخدم الباحثون في هذا العمل مجهراً إلكترونياً خاصاً عالي الجهد الكهربائي يستطيع التشعيع وتوليد السخونة اللازمة للتجربة (انظر الشكل 7 ـ 3).




**الشكل 7 ـ 3: وصل الأنابيب النانوية الوحيدة الجدار. استخدم آجايان، أستاذ علم المواد لدى المعهد** (Rensselaer)**، وزملاؤه في ألمانيا والمكسيك وبريطانيا وبلجيكا[32][31]، الإضاءة بمجهر إلكتروني لتوليد الحرارة وتكوين وصلة اللحام.**

## تطبيقات الأنابيب النانوية

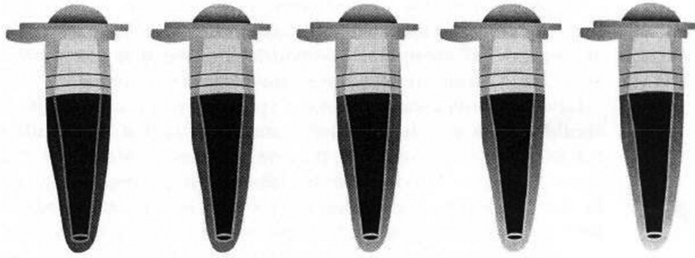
### الدَنا (DNA)

أتجد صعوبة في الإبقاء على جوربيك الأنبوبيين مرتبين؟ حاول إذاً ترتيب أنابيب الكربون النانوية، تلك الجُزَيئات الرائعة التي تجعلها خواصها الكهربائية لَبِنات بناء مرشَّحة لبناء أي شيء، من تجهيزات التشخيص الفائقة الحساسية، حتى الترانزستورات التي هي أصغر بمئة مرة من تلك الموجودة في أسرع الرقاقات الإلكترونية الميكرويّة. لكن المشكلة هي أنه حين صنع الأنابيب النانوية، يكون الناتج مزيجاً من أنابيب ناقلة كهربائياً، وأخرى نصف ناقلة. ونظراً إلى أن تطبيقات الإلكترونيات العملية تتطلّب أنابيب نانوية متجانسة الناقلية، فإن ثمة حاجة إلى تقنيات فرز للأنابيب.

يقول الباحثون لدى دوبّون[33] (DuPont) في ويلمينغتون في ولاية دالاوير إنهم بدأوا بحل المشكلة باستخدام جُزَيء رائع آخر، هو الدَنا. والنتائج مرئية فعلاً. تحتوي قارورة ذات لون وردي محلول أنابيب نانوية شديدة الناقلية. أما القوارير الأخرى، ذات الألوان الخضراء، فتحتوي على أنابيب نانوية نصف ناقلة. يقول بروس وايزمان (Bruce Weisman)، الكيميائي والباحث في الأنابيب النانوية لدى جامعة رايس: «إن أحد الأهداف المركزية لهذا الحقل من البحث الآن هو فرز الأنابيب النانوية، لأن ثمة تطبيقات تمثل فيها مزائج الأنابيب الناقلة ونصف الناقلة عقبة حقيقية. إذا استطاعوا الحصول على قوارير تحتوي على أنابيب مفروزة، كان ذلك نتيجة عظيمة».

وجد الباحثون لدى دوبُّون أن الدَنا الوحيد الجديلة ينزع نحو

الالتفاف حول الأنابيب النانوية، مكوِّناً بنية مستقرة. ولاستغلال هذه الخاصية في فرز الأنابيب، هندسوا دنا (DNA) يلتفّ انتقائياً حول أنابيب ذات ناقلية محدّدة، ثم استخدموا تقنيات مخبرية شائعة لفصل هجين الدَنا والأنابيب النانوية وفقاً للتغير الطبيعي في الدَنا الذي يختلف من سلسلة إلى أخرى. وبذلك تُعزل الأنابيب النانوية المطلوبة (انظر الشكل 7 ـ 4).



**الشكل 7 ـ 4: تبدو الأنابيب النانوية غير المرتبة سوداء في المحلول (أقصى اليسار)، وتبدو الأنابيب الناقلة بلون زهري، وتبدو نصف الناقلة بلون مخضرٍّ.**

## التطبيقات العسكرية والفضائية

ماذا تقول عن سترة مدرَّعة خفيفة الوزن تقيك من البرد وتمكِّنك من الاتصال الهاتفي بالبيت؟ لقد أتى التقانيون النانويون بليف مرن فائق القوة ينقل الحرارة والكهرباء، ويمكن أن تُصنع منه سترة خفيفة الوزن مشابهة لستر السلاسل الحديدية الثقيلة التي كان يرتديها فرسان العصور الوسطى. إذا حيكت السترة الواقية من ذلك الليف الجديد، فإنها سوف تكون خفيفة كالقميص القطني، إضافة إلى كونها واقية من الطلقات النارية.

على مدى مئات ملايين السنين من التطور والارتقاء، طوَّر كثير

من الحيوانات والنباتات والمواد الطبيعية خواص استثنائية. فحرير العنكبوت، مثلاً، أمتن بخمس مرات من الفولاذ (تُعرَّف المتانة بأنها مقياس للطاقة اللازمة لقطع الليف). ويرغب بعض التقانيين النانويين في صنع خيوط تركيبية لها متانة حرير العنكبوت نفسها (الذي ناقشناه سابقاً).

ويمكن لمكوِّنات من قبيل الهوائيات والبطاريات والمجِسَّات والتوصيلات الإلكترونية أن تُنسج ضمن ملابس عسكرية خفيفة الوزن. وعلى غرار ما يحصل غالباً في الملابس العسكرية، يمكن أيضاً استخدام الألياف في الأزياء المدنية الحديثة، لكن ليس قبل تجاوز العقبة الرئيسة الحالية المتمثلة بالسعر العالي جداً لألياف الكربون النانوية الذي يصل حتى 15000 دولار أميركي للأوقية الواحدة. لن يكون الليف الجديد متاحاً على نطاق واسع إلا بعد أن تنخفض تكلفته انخفاضاً ملحوظاً، وهذا غير متوقَّع ضمن السنوات الخمس أو العشر القادمة.

والمصعد الفضائي هو مفهوم يذهب بعيداً في التحدي. تخيَّل (لكن ليس الآن) شريطاً رفيعاً يمتد من سطح منصة في وسط البحر حتى موقعك على ارتفاع 100 ألف كيلو متر في الفضاء[(34)]. يُقال إن المصعد الفضائي قادر على تغيير اقتصاديات السفر إلى الفضاء، جاعلاً المغامرات التي تمتد من الإقامة في فندق فضائي حتى الاستقصاءات العلمية العجيبة ممكنة. حتى عهد قريب، لم تكن ثمة مادة قوية بقدر كافٍ لصنع الحبال اللازمة. إلا أن أنابيب الكربون النانوية يمكن أن تؤدّي المهمة.

يقول دايفد سميثرمان (David Smitherman) لدى مركز مارشال للتحليق الفضائي التابع لوكالة الفضاء الأميركية: «لم يعُد المصعد الفضائي مجرّد خيال علمي». ويوافق الفيزيائي برادلي إدواردز

(Bradley Edwards) على ذلك. فحبل من أنابيب الكربون النانوية، ذو قطر يساوي نصف قطر قلم الرصاص، يستطيع حمل أكثر من 40000 كيلو غرام، وفقاً لقول إدواردز. وهذا يكافئ وزن 20 سيارة من المقاس المألوف.

يتخيَّل إدواردز بناء مصعد فضائي شريطاً تلو آخر، على غرار طريقة بناء الجسور في الماضي. عند بناء جسر فوق واد ضيّق، مثلاً، كانوا يقذفون أولاً حبلاً من طرف الوادي إلى الطرف الآخر. ثم يُربط حبل أطول بالحبل الأول ويُشد بين ضفتي الوادي. وتُكرَّر العملية إلى أن تُستكمل بنية الجسر بكاملها.

على المصعد الفضائي طبعاً أن يمتد على فجوة عريضة. يمكن للحبل الأول أن يتألف من شريط ألياف كربون نانوية مسطح طوله 100000 كيلو متر، وفقاً لرأي إدواردز. ويمكن لصاروخ عادي أن يحمل بكرة من الشريط إلى مدار على ارتفاع 35000 كيلو متر فوق سطح الأرض. لقد اختار العلماء هذا المدار لأنه يُبقي المصعد فوق النقطة نفسها من الأرض في أثناء دورانها. إذا لم يتحقّق ذلك فإن الشريط ينحرف إلى الغرب أو الشرق بالنسبة إلى نقطة ثابتة على الأرض، وهذا يجعل قوة شدّ الشريط تتغيّر.

تتضمّن خطة إدواردز مصعداً على شكل شريط يمتد على مدى 100000 كيلو متر فوق منصة عائمة في المحيط الهادئ بالقرب من الإكوادور. ويمكن لمنصّة أخرى أن تحمل ليزراً قوياً، في قيد التطوير حالياً، يُطلق حزمة ليزرية قوية إلى خلايا طاقة مشابهة لألواح الطاقة الشمسية أسفل طبق متحرك، دافعاً البنية المكوّنة من الأنابيب النانوية إلى أعلى. فإذا سارت الأمور وفقاً لما هو مخطط، فإنه يُتوقع أن يرفع المصعد أحمالاً كالأقمار الصناعية إلى الفضاء بعد نحو خمس عشرة سنة.

## المواد المركَّبة

استُخدمت أنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار لزيادة ناقلية الـ $Al_2O_3$ الكهربائية بنحو 13 مرتبة كِبَر. فقد أخذ غو ـ دونغ تسان (Guo-Dong Zhan) وزملاؤه في جامعة كاليفورنيا بديفيس[35] عيّنة من $Al_2O_3$، وهي عازل سيراميكي، وحوَّلوها إلى مادة مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية مقاومة للكسر تزيد ناقليتها الكهربائية بمقدار 735 في المئة عن السجل القياسي السابق لمادة مركَّبة من السيراميك والأنابيب النانوية.

استخدم أولئك العلماء الأنابيب النانوية لتحسين مقاومة الشدّ والناقلية الكهربائية والخواص الحرارية للمواد المختلفة. إلا أن جمع الأنابيب النانوية مع السيراميكات ليس سهلاً. حيث مزج تسان وزملاؤه أولاً معلقاً من الأنابيب النانوية والإيثانول مع $Al_2O_3$ وتركوه مدة 24 ساعة، ثم استخدموا تقنية التلبيد ببلازما الشرر لدمج المكوِّنات. خلافاً لطرائق التلبيد الأخرى، تسمح هذه الطريقة بتصليد المزيج عند درجات حرارة منخفضة نسبياً لدرء تلف الأنابيب النانوية.

وجد هؤلاء العلماء أن الناقلية الكهربائية ازدادت مع ازدياد نسبة الأنابيب النانوية، وازدياد درجة الحرارة، خلافاً للاكتشافات السابقة. ولاحظوا قيمة عظمى للناقلية تساوي 3375 سيمنس للمتر عند درجة حرارة تساوي 77 مْ في عيّنات احتوت على 15 في المئةح من الأنابيب النانوية. وكشف التصوير بمجهر النفاذ الإلكتروني للبنية الميكرويّة النهائية أن الأنابيب النانوية انتظمت ذاتياً في «حبال» ارتبطت معاً بقوى فان در فالس، وتشابكت ضمن حُبيْبات الـ $Al_2O_3$. ونجم تحسُّن الناقلية عن تشكيل تلك الحبال لمسارات كهربائية مستمرة متداخلة عبر المادة المركَّبة. وتجعل الحبال البنية أقوى أيضاً وأكثر مقاومة للتآكل.

يقول فريق جامعة كاليفورنيا إن المواد المركَّبة ذات الحاضنة السيراميكية يمكن أن تُستخدم في المواد العالية الأداء التي يجب أن تتحمل ظروفاً قاسية من الحرارة والإجهاد الميكانيكي والتعرُّض للمواد الكيميائية. تُستخدم هذه المواد على نطاق واسع في صناعة السيارات والصناعة الجوية والفضائية والدفاعية. ومن تطبيقاتها الأخرى الإلكترونيات الميكرويّة والنانوية والتجهيزات الطبية المختلفة والأعضاء الصناعية.

تُعتبر تطبيقات الأنابيب النانوية القائمة على تقوية المواد المركَّبة البوليمرية مجالاً آخر أُجريت فيه بحوث كثيرة. وأحد أهم تطبيقات ألياف الكربون الشائعة هو تقوية بوليمرات المواد المركَّبة الإنشائية الخفيفة الوزن، الشديدة المتانة، والعالية المقاومة للشد. فقد صُنعت أنابيب كربون نانوية متعدّد الجدران قائمة على الإيبوكسي واختُبرت، إلا أن النتائج لم تكن حاسمة. كانت ثمة تقارير عن زيادة هائلة في مُعَامل يونغ[1] مع انفعال شديد قبل الانقطاع، إلا أن مقاومة المادة للشدّ كانت أقل من المتوقع. يعتمد نجاح المواد المقوّاة بالأنابيب النانوية على مقدار القوة التي يمكن إعطاؤها للملتقى بين الأنابيب النانوية والحاضنة. فسطوح الأنابيب الناعمة نعومة الذرّات لا تضمن ملتقى قوياً. يمكن أن يحصل ترابط جُزَيئي بين الأنابيب النانوية والسلاسل البوليمرية، إلا أنه ليس واضحاً كيف يمكن لمثل هذا الترابط أن يؤثّر في مقاومة الشدّ. ويمكن للانتشار الضعيف التجانس للأنابيب ضمن الحاضنة أن ينتِج مناطق ضعيفة في المادة المركَّبة، مؤدياً إلى نشوء الصدوع. إن نمط الإخفاق الذي لوحظ حتى الآن في هذه المواد المركَّبة هو الهشاشة الشديدة المماثلة لتلك التي يتصف بها الإيبوكسي الصافي.

يمكن للمواد المركَّبة الشديدة الناقلية (الكهربائية والحرارية)، التي تستخدم بوليمرات محشوّة بأنابيب كربونية نانوية، أن تكون ذات فائدة،

إلا أن المشكلة تكمن في الوصول إلى توزيع جيّد للألياف النانوية ضمن الحاضنة. وقد ظهرت هذه المشكلة عند تحضير أنابيب نانوية أكبر أساسها الإيبوكسي[1]، ولعل ذلك بسبب غياب المفاعيل المشتركة بين الأنابيب والحاضنة. ومع ذلك فإنّ إحدى فوائد استخدام الأنابيب النانوية في تحضير المواد المركَّبة هي السلامة شبه التامة لهذه الأنابيب في أثناء المعالجة. فانهيار الألياف يمثِّل مشكلة كبيرة عند تحضير المواد المركَّبة الحاوية على ألياف الكربون بسبب هشاشة الألياف.

إضافة إلى الأعمال التي تخص المواد المركَّبة الإنشائية، ثمة سعي إلى تحقيق بعض الخواص الفريدة من خلال الإشابة الفيزيائية للبوليمرات (أي حشوها) بالأنابيب النانوية. وعرض نظام من هذا القبيل في بوليمر مترافق متألق هو بولي (ميتا فينيلين فينيلين ـ مشترك ـ 2.5 ـ ثنائي أوكتوكسي ـ بارا فينيلين فينيلين) (Polyphenylenevinylene) (PPV)، المحشو بأنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار والمتعدّدة الجدران. وثمة اتجاهات جديدة لاستخدام الأنابيب النانوية في الحاضنات البوليمرية في قيد الاستقصاء لتحقيق خواص بصرية لاخطية، وتقانات للأغشية، ومواد أعضاء صناعية للتطبيقات الحيوية.

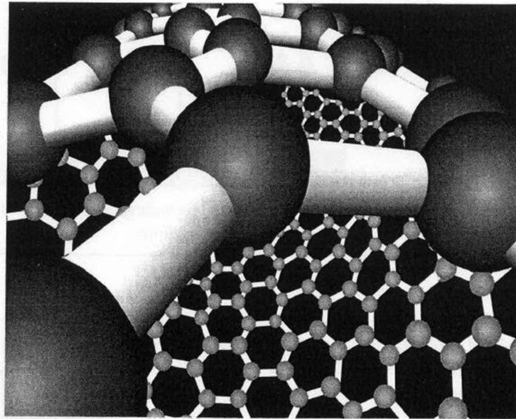
### التطبيقات الطبية

إن أحد البرامج قيد التطوير في معهد السرطان الوطني الأميركي هو استخدام المُحِسَّات الحيوية القائمة على الأنابيب الكربونية النانوية في تشخيص السرطان. وفي عمل آخر يخطط الباحثون[33] لاستخدام هجين من الدَنا والأنابيب النانوية في نماذج أولية من المُحِسَّات للتشخيص الطبي. في هذا التطبيق، يزاوجون بين الأنابيب النانوية وسلاسل دَنا تخصّ عاملاً مُمْرِضاً، حيث تُحقِّق الأنابيب النانوية الارتباط كهربائياً. ويمكن استخدام الأنابيب الطويلة

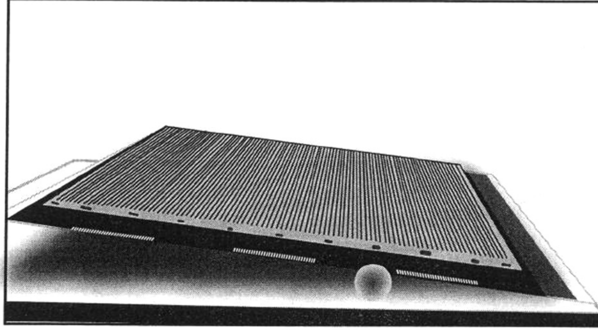
المرتبة، بعد تسخينها لتفكيك هجين الأنابيب النانوية والدنا، مفاتيحَ أو عناصر أخرى في التجهيزات الإلكترونية الجُزَيئية.

## المنتجات التجارية والألياف الضوئية

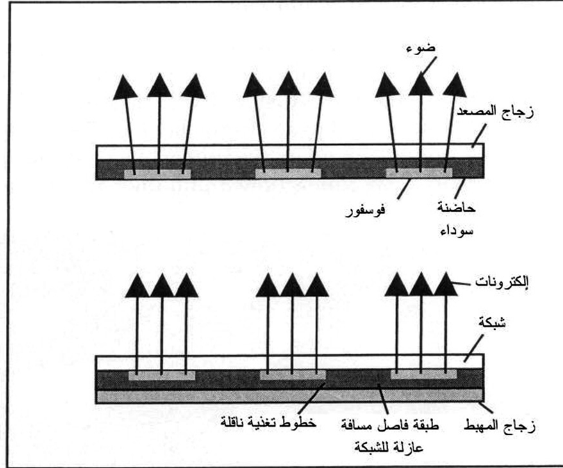
يمكن لسعر تلفاز كبير الشاشة أن يهبط إلى حد يمكّن جميع الناس من شرائه. ويعود الفضل في ذلك إلى تقانة الأنابيب النانوية الكربونية التي تُطبَّق حالياً لدى شركة Nano Proprietary Inc. في أوستن بتكساس[1]. تعمل أنابيب الكربون كمدافع الإلكترونات، أي إنها تُصدر إلكترونات حين تعريضها إلى حقل كهربائي. ويؤدّي تجميع الأنابيب حول فوسفورات حمراء وخضراء وزرقاء إلى تكوين عناصر صورة (بيكسلات (Pixels)) على الشاشة، وهذا ما يمكّن من صنع شاشات مسطّحة كبيرة لا تزيد سماكاتها على 2 ملم (انظر الأشكال 7 ـ 5 و7 ـ 6 و7 ـ 7).



**الشكل 7 ـ 5: نموذج رسمه فنان لأنبوب نانوي كربوني مكوَّن من طبقة واحدة. يمكن للأنابيب أن تكون متعددة الطبقات، أما مزيتها الكبرى فهي أن ذرات الكربون تتخلى عن الإلكترونات بسهولة بوجود حقل كهربائي، بمعنى أنها تعمل كمدفع إلكترونات ضئيل[36].**



**الشكل 7 ـ 6: نموذج أولي للوحة سماكتها 2 مم مصنوعة من أنابيب كربون نانوية. يساوي قطر نموذج إثبات الفكرة هذا 13.6 إنشاً، ويحتوي على 96 × 96 عنصر صورة (بكسل)، ويستطيع توليد 64 مستوى من اللون الرمادي. يمكن أيضاً صنع لوحة لتلفاز ملوَّن شديد الوضوح ذي قطر يساوي 60 إنشاً أو أكثر يعمل بجهد تبديل كهربائي يقل عن 100 فولط [36].**




**الشكل 7 ـ 7: تُصنع الشاشة التي يقترحها يانيف من أربع طبقات بسيطة تبدأ بزجاج منخفض السعر. وأول ما يتوضَّع على الزجاج مساري كهربائية مع طبقة سوداء تحمل الطبقات التالية. تُشكَّل الطبقة السوداء بحيث تترك منطقة عنصر الصورة مكشوفة. ثم تُوضَّع أنابيب كربون نانوية فوق عناصر الصورة باستخدام تقانة مخصَّصة لهذا الغرض. وتمثِّل شبكة معدنية متوضِّعة فوق المادة الحاملة للطبقة السوداء المهبط.**

يـقـول زفـي يـانـيـف (Zvi Yaniv)، رئـيـس شـركـة Nano Proprietary[36]: «يمكن صنع أنابيب من طبقة واحدة أو طبقات عدة من الكربون، أقطارها تساوي نحو 5 ـ 6 نم، لكنها طويلة نسبياً، فأطوالها تصل حتى 10 ـ 30 ميكرون. والشيء الجيد هو أنها غنية بالإلكترونات الحرة، أي تلك التي تنسلخ من ذرّاتها بسهولة حين تطبيق حقل كهربائي». ويقول يانيف إنه بنى نموذجاً أولياً لشاشة رمادية التدرّج تقوم على الأنابيب النانوية، وأن ثمة نموذجاً ملوّناً آخر قيد التطوير.

ويقول يانيف إن المشكلة في عالم الشاشات هي أنه ثمة كثير من التقانات، وأنّ المطوّرين يحاولون دفع كلٍّ منها إلى أقصى مداه، مهما كان الثمن. على سبيل المثال، ليست شاشات البلّورات السائلة اقتصادية للمقاسات الكبيرة، أي التي تزيد على 60 إنشاً. ومع ذلك، يحاول مصنِّعو الشاشات دفع هذه التقانة نحو أقطار أكبر لأنهم يعرفون أن التلفاز الشديد الوضوح سوف يكون أكثر طلباً في السوق بالمرحلة القادمة. وليست البلازما، وهي تقانة شاشات مسطّحة أخرى، جيدة للشاشات الصغيرة التي هي من قبيل تلك المستخدمة في الحواسيب المحمولة، إلا أنها تتصف ببعض المزايا للشاشات الكبيرة. ويقول أيضاً: «لذا استُخدمت البلازما فعلاً في الشاشات الكبيرة. لكنها مُكلفة وشديدة استهلاك الطاقة». أما شاشات صمّام الأشعّة المهبطية فقد خرجت من السوق لأنها كبيرة الحجم. ويكمن جمال أنابيب الكربون النانوية في أن هناك مدفعاً إلكترونياً لكل عنصر صورة، وتساوي سماكة الشاشة من حيث المبدأ سماكة الركيزة الزجاجية الحاملة للأنابيب النانوية. وقد عرض عدة مصنِّعين يابانيين نماذج أولية تقوم على أنابيب الكربون النانوية، وهذا أمر مفهوم، لأن مبيعات الشاشات الكبيرة يمكن أن تتجاوز 100 مليار دولار أميركي.

ويعتقد باحثون في علم الجُزَيئات لدى منظمة الكومنويلث الأسترالية للبحوث العلمية والصناعية[37] أن التطوّرات في تقانة الأنابيب النانوية يمكن أن تمهد الطريق لنوع جديد كلياً من شاشات التلفاز والحاسوب المسطّحة. وهم يتوقعون أن الشاشات الجديدة سوف تكون أرق، وأسهل استخداماً، وأقل استهلاكاً للطاقة، وأطول عمراً من شاشات البلّورات السائلة، إضافة إلى إمكان جعلها مرنة. وقد وجدوا طريقة للتحكُّم بترتيب الأنابيب النانوية، حيث يجعلونها على شكل أسلاك جُزَيئية. وتعمل هذه الأسلاك في الشاشات واسطة لتبئير الإلكترونات على سطح حيث تتفاعل مع مادة متألّقة بالفَلْورَة تشعّ ضوءاً من الشاشة.

واكتشف الباحثون لدى معهد رنسلِّير التقاني[38] أن الأنابيب النانوية الكربونية الوحيدة الجدار تشتعل حين تعرّضها إلى نبضة ضوء قوية. لذا يرون أنها يمكن أن تُستخدم في مُحِسَّات الضوء، أو في قدح المتفجرات من بعد.

قبل الاشتعال، تُصدر الأنابيب النانوية صوتاً مدوياً يُعرف بمفعول الصوت الضوئي (Photoacoustic Effect)، وهي ظاهرة لم تكن معروفة في أنابيب الكربون النانوية من قبل. يحصل هذا المفعول حينما تمتص أجسام مسامية سوداء، كالأنابيب النانوية، مقداراً كبيراً من الضوء، فتجعل الغاز المحيط بها يتمدّد ويتقلّص مُصدِراً الصوت.

وأجرى أولئك الباحثون تجارب لرؤية كيفية تأثير التعرّض للضوء في الأنابيب النانوية. ووجدوا أنه برغم أن الأنابيب لا تحترق إلا بوجود الأُكسجين، فإن بنيتها الذريّة تتغيّر حين تعرّضها لنبضة ضوء قوية حتى لو كانت في غاز خامل. يقول غاناباثيرامان رامانات (Ganapathiraman Ramanath)، أستاذ علم المواد المساعد في معهد رنسلِّير التقاني: «وفق ما نعلم، لا توجد مادة أخرى تُصدر

مثل هذا الصوت العالي وتشتعل تلقائياً حين تعرّضها إلى ضوء غير مبأّر منخفض القدرة». ويضيف: «إن عملنا يفتح إمكان استخدام منابع ضوء منخفضة القدرة لتكوين أنواع جديدة من المواد النانوية، وهو يمثّل نقطة بداية لتطوير مفعّلات ومُحِسَّات قائمة على الأنابيب النانوية تعتمد على التفعيل والقدح من بعد».

أخيراً، اكتشف العلماء لدى مركز بحوث شركة IBM[39] طريقة جديدة لجعل أنابيب الكربون النانوية تشعّ ضوءاً، وهذا فتحٌ يمكن أن يؤدّي يوماً ما إلى تطوّرات في تقانة الألياف الضوئية.

ظهرت أنابيب الكربون النانوية بوصفها بدائل لتحل محل السليكون والمعدن في صناعة الرقاقات الإلكترونية بعد نحو 10 ـ 20 سنة. أما في المستقبل القريب، فيمكن استخدام الأنابيب النانوية لصنع دهانات منيعة على التآكل، أو لتحسين خلايا الوقود والبطاريات.

أما أبحاث شركة IBM وجامعة تورونتو، فتشير أساساً إلى تطبيق محتمل آخر، هو توليد الضوء، وهذا ليس سهلاً أو رخيصاً. إن التجهيزات الضوئية الحالية تقوم بالمهمة، إلا أن مكوِّنات توليد الضوء صعبة التصنيع، ولذا، فهي مكلفة. بالمقارنة، يمكن إنتاج أنصاف النواقل كمياً بتكاليف قليلة، إلا أن الباحثين حاولوا جعل السليكون يولّد ضوءاً بكفاءة، لكنهم لم ينجحوا.

إلى جانب إمكان استخدام الألياف الضوئية في الرقاقات الإلكترونية، فإن هذه التقانة مستخدمة فعلاً في نقل المعلومات أيضاً عبر الشبكات الهاتفية والمعلوماتية الواسعة النطاق. فهي تحمل معلومات أكثر مما تحمله أسلاك النحاس. إلا أنها أغلى، وتركيبها أصعب. أما الاستخدام الاستهلاكي لها، فما زال بعيداً. إلا أن ثمة تطبيقات لها بالتأكيد لتكون صلة وصل بين الجانبين الإلكتروني

والضوئي في تجهيزات الاتصالات. لكن التطبيق القريب الأجل للألياف الضوئية سيكون في المُحِسَّات.

وفي تجارب لشركة بحوث IBM، ظهر ضوء حين تطبيق شحنة سالبة على إحدى نهايتي الأنبوب النانوي، وشحنة موجبة على النهاية الأخرى. يتولَّد الضوء في الألياف الضوئية حالياً بهذه الطريقة، إلا أنه تجب إشابة المواد، أو طليها كيميائياً كي تتلاقى الشحنات المتعاكسة. أما في حالة الأنابيب النانوية، الشديدة الضآلة إلى حد يمكن اعتبارها جُسيْمات وحيدة البُعد، فلا حاجة إلى ذلك.

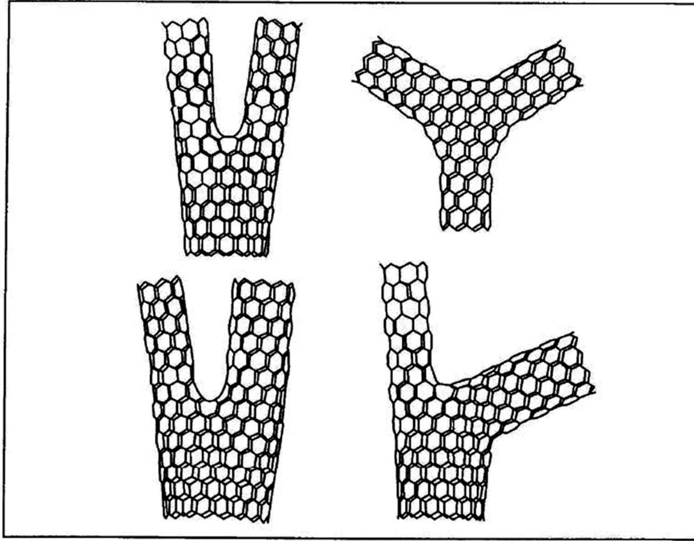
يقول فيدون أفوريس (Phaedon Avouris)، مدير التقانة والعلوم النانوية لدى شركة بحوث IBM: «حين التقاء الإلكترونات والثقوب (التي تمثِّل شحنات موجبة) معاً، يُحيِّد كل منها الآخر، ويتحوّلان إلى ضوء. والأنبوب النانوي هو نهاية المطاف في احتواء الإلكترونات والثقوب. إذا وضعت إلكتروناً في أحد طرفي الأنبوب، ووضعت ثقباً في الطرف الآخر، فسوف يجد كل منهما الآخر».

اتصف الضوء الصادر عن الأنابيب النانوية بطول موجة يساوي 1.5 ميكرون، وهو طول الموجة نفسه المستخدم اليوم في الألياف الضوئية، وفق قول أفوريس. هذا يعني أن ثمة إمكانية لاستخدام صفيفات من الأنابيب النانوية المولِّدة للضوء ضمن كابلات الألياف الضوئية بُغية نقل البيانات.

### الإلكترونيات

تُستقصى وصلات أنابيب الكربون النانوية المتعدّدة النهايات لاستخدامها كمكوّنات في الدارات والتجهيزات الإلكترونية النانوية المقاس[40]. وقد تبيَّن أن الوصلات الثلاثية النهايات «Y» (انظر الشكل 7 ـ 8) على درجة من الأهمية لأنه من الممكن الآن تحضيرها بكميات كبيرة بطريقة متحكّم بها، ولأن النتائج الأولية

لدراستها التجريبية والنظرية توحي بأنها يمكن أن تمتلك خواص تبديل وتقويم كهربائية.



**الشكل 7 ـ 8: جرت دراسة تجريبية ونظرية لوصلات أنابيب نانوية كربونية ذات شكل Y متناظر وغير متناظر بغية استخدامها كمفاتيح ومقوّمات إلكترونية[40].**

ولاحقاً للدراسات الأولية، جرى حساب خصائص العلاقة بين التيار والجهد الكهربائيين لعدد من الوصلات الثلاثية النهايات المختلفة المصنوعة من أنابيب كربون نانوية وحيدة الجدار، وتضمنّت الأنابيب النانوية المستخدمة أنابيب ناقلة وأخرى نصف ناقلة، ذات لاانطباقيات متنوعة. وكانت أغلبية الوصلات التي اختُبرت متناظرة.

وبيَّنت نتائج النمذجة الحاسوبية أن الوصلات المتناظرة يمكن أن تُستخدم في كل من التبديل والتقويم. وبيَّنت أيضاً أن خواص التبديل والتقويم في الوصلة يمكن أن تعتمد كثيراً على تناظرها، وعلى لاانطباقية الأنابيب بدرجة أقل. وعلى وجه الخصوص، فقد

تبيَّن أن التفرُّع المتعرِّج للأنابيب النانوية عند وصلات «Y» متناظرة يمكن أن يؤدّي إلى تقويم كلي أو جزئي للتيار الكهربائي (خصائص تيار ـ جهد غير متناظرة).

وتمكَّن فريق بحث لدى الشركة Georgia Tech[41] من إجراء سلسلة من التجارب التي بيَّنت وجود الناقلية القذفية (Ballistic Conductance) في أنابيب نانوية تصل أطوالها حتى 5 ميكرون عند درجة حرارة الغرفة، وهذه ظاهرة تمر فيها الإلكترونات عبر ناقل من دون تسخينه. إن انعدام التسخين يسمح للأنابيب النانوية بحمل تيارات ذات كثافات هائلة، وقد قاس فريق البحث كثافات تزيد على 10 ملايين أمبير/سم$^2$. إن تيّاراً بهذه الكثافة يولِّد عادةً، في ظروف أخرى، حرارة تصل حتى 000 20 كلفن، وهي أعلى كثيراً من درجة احتراق الأنابيب النانوية التي تساوي 700 كلفن.

يقول والتر دو هير (Walter de Heer)، وهو أستاذ فيزياء لدى (Georgia Tech): «هذه أول مرة تُشاهد فيها الناقلية القذفية عند أي درجة حرارة في نظام ثلاثي الأبعاد بهذه الكثافة الكبيرة. إنها تُظهر أنه يمكنك قصر تدفّق التيار على مناطق ضيقة من دون تسخينها، وهذا مهم للإلكترونيات الفائقة الصغر».

ووجد فريق البحث أيضاً أن المقاومة الكهربائية في الأنابيب النانوية لا تتأثر بطول الأنبوب. يقول وانغ (Wang)، الأستاذ لدى مدرسة علم وهندسة المواد لدى (Georgia Tech): «في الفيزياء التقليدية، تتناسب مقاومة قضيب معدني مع طوله. فإذا ضاعفت طول القضيب، حصلت على ضعف المقاومة. لكن في تلك الأنابيب النانوية، المقاومة مستقلة عن طول الأنبوب وقطره».

ويقول هير إن ذلك ناجم عن أن الإلكترونات تعمل بوصفها

موجات أكثر منها جُسيْمات ببُناها ذات المقاس الذي يقارب طول موجة الإلكترون: «تمر الإلكترونات عبر هذه الأنابيب النانوية كما لو كانت أمواج ضوء تمر عبر دليل موجة. إنها أقرب إلى البصريات منها إلى الإلكترونيات».

يمكن لهذا البحث أن يكون مفيداً في صنع تجهيزات أصغر من أي شيء صُنع من قبل. فمقدرة بُنى معيّنة على نقل تيارات شديدة نسبياً من دون تسخين ضار، تسمح للمهندسين باستخدام نواقل صغيرة جداً.

ويقول باحثون لدى مركز بحوث آمس التابع لوكالة الفضاء الأميركية في كاليفورنيا[(42)]، إنه جرى تطوير أنابيب كربون نانوية لتحل محل الوصلات النحاسية ضمن الدارات المتكاملة. فنظراً إلى أن مقاومة النحاس للتيار الكهربائي تزداد كثيراً مع تقلّص أقطار الأسلاك، فإن ثمة حداً أدنى لقطر الناقل الذي يمكن استخدامه.

ويقول جون لي (Jun Li)، الباحث لدى مركز آمس: «إحدى مزايا توصيلات أنابيب الكربون النانوية ضمن الدارات المتكاملة هي أن تلك التوصيلات تتصف بالمقدرة على نقل تيارات شديدة جداً، تزيد على مليون أمبير/سم$^2$ من دون حصول تدهور في الأداء». يُضاف إلى ذلك أن سيرورة بناء الأنابيب النانوية في الدارات لا تتطلب أخاديد على شُراحات السليكون كتلك اللازمة للنحاس. وسوف يكون المصنِّعون قادرين أيضاً على إضافة مزيد من طبقات العناصر الإلكترونية إلى الرقاقات السليكونية بسبب الحجوم الصغيرة والناقلية الشديدة لأنابيب الكربون النانوية.

تتضمّن هذه التقانة تنمية أنابيب كربون نانوية على سطح شراحة سليكون بطريقة كيميائية. تُوضَّع طبقة من $SiO_2$ على أنابيب نانوية،

جرت تنميتها على الرقاقة، لملء الفراغات ما بين الأنابيب، ثم يُصقل السطح ليصبح مستوياً. ويمكن بعدئذٍ بناء مزيد من الطبقات المتعدّدة، الكعكية الشكل، مع أنابيب كربون نانوية عمودية تَصِل بين طبقات الإلكترونيات التي تتكوَّن منها الرقاقة.

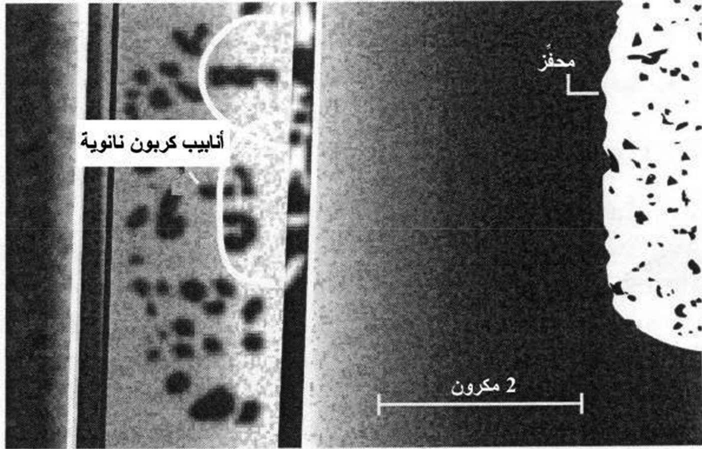
لكن الصعوبة الكبيرة التي تواجه استخدام أي ترانزستور، مهما كان نوعه، هي ضخ الإلكترونات فيه من سلك معدني. وقد تجاوز المهندسون عقبة شوتكي (Schottky) هذه في أنصاف النواقل السليكونية بالاستعاضة عن سلك المعدن بجديلة سليكونية مَشوبة بعناصر أخرى. وقد وجد الآن باحثون في جامعتي ستانفورد وبِرديو[43] طريقة للالتفاف على عقبة شوتكي في أنابيب الكربون النانوية نصف الناقلة، التي تصعب إشابتها بالطريقة المعتادة. فقد وصلوا أنابيب ثخينة (أقطارها تساوي 3 نم) إلى أسلاك بالاديوم، وهي ناقلة وتلتصق جيداً بالأنابيب النانوية على نحو عجيب. تستطيع الأنابيب النانوية عندئذٍ حمل كهرباء تساوي نحو 5 أمثال ما كان ممكناً من قبل، أي ما يقارب الحد القذفي النظري (حيث تتحرك الإلكترونات من دون ارتداد عن الجُسيْمات الأخرى). إن التيارات الشديدة تمثّل مفتاح تصنيع رقاقات الحاسوب العالية القدرة.

ووجد فيزيائيون آخرون أن أنابيب الكربون النانوية نصف الناقلة تتصف بأعلى «حركية» بين جميع المواد المعروفة عند درجة حرارة الغرفة، والمقصود بالحركية هو جودة نقل أنصاف النواقل للكهرباء. إذ أبدى ترانزستور مصنوع من أنبوب نانوي واحد حركية تزيد بسبعين مرة على تلك التي للسليكون المستخدم في رقاقات الحاسوب الحالية.

كان على الباحثين تنمية أنابيب كربون نانوية طويلة جداً، تصل أطوالها حتى 0.3 مم، وكان عليهم توضيع سلكين معدنيين بدقة عند

نهايتي أنبوب واحد لإجراء القياسات. وهذه التقانة مرشحة الآن بقوة لتحل محل رقاقات السليكون، إذا أمكن حل مسائل الرقاقات والإنتاج.

وبنى باحثون لدى جامعتي كاليفورنيا وستانفورد[44] تجهيزة لأتمتة عملية ترميز آلاف أنابيب الكربون النانوية على رقاقة سليكونية. فقد صنعوا رقاقة دارة سليكونية من نصف ناقل من أُكسيد المعدن (موس) (Metal Oxide Semiconductor) (MOS)، وأسموها RANT (الأحرف الأولى من الجملة Random Access Nanotube Test Chip)، أي (رقاقة اختبار الأنابيب النانوية بالنفاذ العشوائي)، وهي تحتوي على شبكة من أسلاك ومفاتيح السليكون التي تتألف الدارة منها (انظر الشكل 7 ـ 9).




**الشكل 7 ـ 9: صورة مكبرة لأنبوب كربون نانوي نُمِّي على دارة موس سليكونية. تمثِّل المنطقة البيضاء في أعلى اليمين جزيرة المحفِّز التي جرت تنمية الأنبوب النانوي فوقها[44].**

باستخدام هذه الدارة الموصولة مع آلاف أنابيب الكربون النانوية على رقاقة سليكون مساحتها تساوي 1 سم$^2$، يستطيع الباحثون فصل أو وصل مفاتيح معيّنة لعزل مسار يقود إلى أنبوب نانوي محدّد. وهم بهذا لا يستطيعون تحديد الأنبوب النانوي الذي يستجيب لتيار كهربائي يمر عبر النظام فحسب، بل يستطيعون أيضاً تحديد إن كان من الممكن تغيير ناقليته. إذا تمكنوا من تغيير ناقلية الأنبوب النانوي، عرفوا أنه نصف ناقل، لا ناقل.

تمثّل هذه التطوّرات خطوة باتجاه استخدام أنابيب الكربون النانوية في رقاقات ذاكرة تستطيع خزن بيانات يزيد مقدارها بعدة مراتب كِبَر عما تستطيع خزنه رقاقات السليكون الحالية، أي بنحو 10000 مرة وفق بعض التقديرات، أو في مُحِسَّات ذات حساسية كافية لكشف آثار متفجرات أو عوامل حرب كيميائية حيوية في المستوى الجُزَيئي.

لم يُعلن أحد على الملأ حتى الآن نجاحه في المكاملة المباشرة للأنابيب النانوية مع الدارات السليكونية. إن هذه المكاملة خطوة أولى حاسمة في بناء منتجات إلكترونية نانوية متقدمة، توضع فيها أنابيب كربون نانوية فوق دارات سليكونية متكاملة قوية كي تكوِّن الملتقى مع نظم معالجة المعلومات التي تقوم عليها[44].

التطبيق الآخر الذي استحوذ على انتباه العلماء والمهندسين هو استخدام الأنابيب النانوية كمُصدِرات للإلكترونات[22][21]، فقد شوهد الإصدار الحقلي من صفيفات أنابيب كربون نانوية متعدّدة الجدران مُصطفة جزئياً. صُفَّت تلك الأنابيب بتمرير معلّق طينيّ القوام من الأنابيب النانوية عبر مرشح سيراميكي، ونُقل غشاء الأنابيب المصطفّة بعدئذٍ على ركيزة، ثم طُبِّق جهد كهربائي بين الغشاء الحامل لها ومجمِّع. تعمل أغشية الأنابيب النانوية هذه كمُصدّرات إلكترونات

بجهود كهربائية عاملة تساوي بضع عشرات من الفولتات، وبكثافات تيار تساوي بضع مئات من الميلي أمبير/سم$^2$. ويبقى مُصدِر الإلكترونات المصنوع من الأنابيب النانوية مستقرّاً على مدى ساعات عدّة من الإصدار الحقلي، وهو مستقر هوائياً أيضاً. لكن إحدى المشاكل العملية التي يجب حلها هي الحصول على أنابيب متجانسة الاصطفاف لضمان إصدار حقلي متجانس.

ونظراً إلى نِسَب الأنابيب النانوية البُعدية الكبيرة، وإلى مقاومتها الميكانيكية ومرونتها، فإنه يمكن استعمالها مسابرَ نانوية، أو في نهاية مجهر المسح بالمسبر، على سبيل المثال. وقد عرضت هذه الفكرة بنجاح باستخدام رأس مسبر مصنوع من الأنابيب النانوية في مجهر قوة ذريّة لتصوير الأشكال السطحية لغشاء ألمنيوم مطلي بخليطة TiN[(1)].

## الإمكانات المستقبلية

خلال المدة القصيرة التي امتدت من وقت اكتشاف أنابيب الكربون النانوية في عام 1991 حتى الآن، استحوذت تلك الأنابيب على مخيّلة الكيميائيين والفيزيائيين وعلماء المواد. وقد طغى الاهتمام بهذه المادة على الاهتمام بالفُلّرينات في السنوات الأخيرة، برغم أن الأنابيب النانوية ليست متاحة عملياً كالفُلّرينات. فسعر الأنابيب النانوية في السوق حالياً ما زال مرتفعاً جداً (نحو 400 دولار أميركي للغرام الواحد من الأنابيب المتعدّدة الجدران الجيدة، وضعف ذلك المبلغ للوحيدة الجدار)، وثمة حاجة إلى تطوير طرائق إنتاج جديدة قائمة على سيرورة مستمرة لتخفيض التكلفة. لكن عندما توجَّه الباحثون إلى آليات التنمية بغرض استقصاء منهجيات تصنيع جديدة، وجدوا أن

الجانب النظري مخيّب للآمال. إلا أن الجدير بالملاحظة هو أن طريقة الليزر لإنتاج أنابيب الكربون النانوية الوحيدة الجدار التي أُعلنت في عام 1996، مثّلت قفزة بتوفيرها كميات مناسبة من تلك الأنابيب. لقد قُدِّم كثير من التوقّعات النظرية على نمذجة الأنابيب الوحيدة الجدار، وهي أنابيب ذات جودة عالية تنطوي على إمكان اختبار بعض تلك التوقّعات. وفعلاً، جرى التحقُّق من صحة معظم تلك النماذج، وهذا شيء جيد.

إنه لمن الصعب التكهن بما سوف يؤول إليه مستقبل الأنابيب النانوية. لكن أكثر التطوّرات وعداً ونجاحاً حصلت في استقصاء الإلكترونيات القائمة على الأنابيب النانوية. إنه لمن الواقعي أن يتخيَّل المرء أنه بعد بضع سنوات من الآن سوف تصبح أنابيب الكربون النانوية جزءاً لا يتجزأ من الدارات الإلكترونية الميكرويّة. إذ عُرضت مفاهيم مهمة قائمة على تجهيزات مصنوعة من أنابيب نانوية جُزَيئية، إلا أن الصعوبة الكبرى ما زالت تكمن في إنشاء بنيان يقوم على الأنابيب النانوية متوافق مع تقانة تصنيع الإلكترونيات الموجودة حالياً والمستقبلية. ثمة تقارير عن تداول الأنابيب النانوية فرادى ووضعها في مواقع معيّنة وبتشكيلات محدّدة[(46)(45)(1)]، إلا أنه من الواضح أن هذا ليس هو النهج الذي يجب اتباعه لتصنيع بنيانات شديدة التعقيد من مكوِّنات إفرادية.

يجب ألاَّ ننسى أن ألياف الكربون موجودة منذ أكثر من ثلاثة عقود، ولم يُنظر فيها عملياً قط لاستخدامها في التطبيقات الإلكترونية بسبب العيوب البنيوية العالية الكثافة. إلا أنها وجدت تطبيقات مهمة في تقانات المواد المركَّبة وفي مساري تحويل الطاقة. وفي ما يخص الأنابيب النانوية، وهي الشكل النهائي لألياف الكربون، فإنه سوف يكون من المفاجئ إذا لم تُطوَّر تطبيقات لها في المجالات التي

تُستخدم فيها ألياف الكربون العادية بكثافة. إن إحدى مشاكل المواد المركَّبة القائمة على الأنابيب النانوية هي الافتقار إلى فهم ميكانيك تضمين أو حشو أجسام نانوية المقاس في الحاضنة. ثمة حاجة إلى كثير من العمل الشاق والمكرَّس بغية الإجابة عن بعض الأسئلة الجوهرية المتعلقة بذلك. ويجب التفريق بين ألياف الكربون والأنابيب النانوية. فالأخيرة أقرب إلى البُنى الجُزَيئية، وخواصّها محكومة كثيراً بالتفاعلات في المستوى الذرّي. ويجب أيضاً استقصاء مجالات أخرى من تطبيقات المواد المركَّبة (إضافة إلى الإنشائية) التي تتصف بخواص بوليمرية من قبيل التألق الضوئي (Photoluminescence) الذي يمكن أن يُفصَّل وفق الحاجة بالإشابة الفيزيائية بالأنابيب النانوية. إن ثمة الكثير من الوظائف الجديدة البازغة التي يمكن تحقيقها بالاستخدام الحصيف للأنابيب النانوية في المواد المركَّبة.

تسمح أبعاد الأنابيب النانوية البالغة الصغر، ومقاومتها الميكانيكية ومرونتها، باستخدامها مسابر نانوية. يمكن التفكير باستخدام هذه المسابر في تطبيقات متنوعة، ومنها التصوير ذي الميْز الدقيق، والطباعة النانوية، والمساري النانوية، والمُحِسَّات، ومُصدرات الإلكترونات الحقلية.

وبناءً على التقدم الذي تحقَّق حتى الآن، من المعقول جداً توقُّع أن تصبح الأنابيب النانوية يوماً ما جزءاً لا يتجزأ من حياتنا، من خلال التقانة المتقدمة التي يمكن أن تحقِّقها[45][46]. سوف تغيّر التقانة النانوية العالم، ويُؤمل أن يكون ذلك نحو الأفضل. يُظهر الشكل 7 ـ 10 توقّعات الاستهلاك الحالي والمستقبلي في الولايات المتحدة من جميع أنواع المواد المركَّبة النانوية. وبحلول العام 2020، يُتوقع أن تكون الصلصالات والمواد المعدنية أكثر المواد انتشاراً من حيث الحجم، وسوف تكون الأنابيب النانوية أعلى المواد قيمة وأهمية.

| النمو السنوي | (ملايين الباوندات) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2020-2003 | 2020 | 2013 | 2008 | 2003 | السوق |
| %23 | 1500 | 305 | 120 | 47 | التعليب والتغليف |
| %32 | 2000 | 220 | 41 | 18 | الإنشاءات |
| %36 | 1400 | 210 | 55 | 8 | الكهربائيات والإلكترونيات |
| %44 | 2400 | 340 | 40 | 5 | السيارات والآليات |
| %45 | 1100 | 60 | 10 | 2 | السلع الاستهلاكية |
| %27 | 2200 | 225 | 79 | 40 | مجالات أخرى |
| %30 | 10600 | 1360 | 345 | 120 | المجموع |
| %4 | 76000 | 58000 | 47200 | 38700 | مجمل المركبات اللدائنية |
| - | 13.9 | 2.3 | 0.7 | 0.3 | نسبة المواد المركّبة النانوية |

الشكل 7 ـ **10**: الطلب من المواد المركَّبة النانوية [47].

# الهوامش


1. P. M. Ajayan, «Carbon Nanotubes,» in: H. S. Nalwa, ed., *Handbook of NanoMaterials and Nanotechnology* ([n.pb.]: Academic Press, 2000), vol. 5: *Organics, Polymers, and BioMaterials*, pp. 329-357.
2. B. S. Files and B. M. Mayeaux, «Carbon Nanotubes,» *AM&P* (October 1999), pp. 47-49.
3. B. Hunt, F. Noca and M. Hoenk, «Carbon Nanotube Bimorph Actuators & Force Sensors,» *NASA Tech Briefs* (September 2001), p. 33.
4. R. H. Baughman, «Carbon Nanotube Actuators,» *Sci*, 284, 1340 (1999).
5. «NASA Tech Briefs Insider,» http:/ /link.abpi.net/ l.php?20030904A2, September 4, 2003, pp. 1-2.
6. Unusually Long & Aligned Buckytubes Grown at Duke, Net Composites, http:// www.netcomposites.con/news.asp?1654, July 5, 2003, p. 1.
7. «Chemists ID Process to Sort Carbon Nanotubes by Electric Properties, The Rice University Weekly,» Online: http:/ /

www.rice.edu/projects/reno/Newsrel/ 2004/2003091 - sorting.shtml, October 24, 2003, p. 1.
8. C. Dekker, «Carbon Nanotubes as Molecular Quantum Wires,» *Physics Today* (May 1999), pp. 22-28.
9. B. I. Yakobson and R. E. Smalley, «Fullerene Nanotubes: C 1,000,000 and Beyond,» *American Scientist*, 85, 324 (1997), pp. 324-337.
10. M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P. C. Eklund, *Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes (*San Diego, CA: Academic Press, 1996).
11. T. W. Ebbesen, ed., *Carbon Nanotubes: Preparation and Properties* (Boca Raton, FL: CRC Press, 1997).
12. R. Saito, M. S. Dresselhaus and G. Dresselhaus, *Physical Properties of Carbon Nanotubes* (London: Imperial College Press, 1998).
13. T. W. Ebbesen, *Physics Today* (June 26, 1996).
14. P. M. Ajayan and T. W. Ebbesen, *Rep. Prog. Phys.*, 60, 1025 (1997).
15. M. S. Dresselhaus [et al.], *Phys. World* (33 January 1998).
16. S. Iijima, T. Ichihashi and Y. Ando, *Nature,* 356, 776 (1992).
17. P. M. Ajayan, T. Ichihashi and S.Iijima, *Chem. Phys. Lett.*, 202, 384 (1993).
18. B. I. Yakobson and R. E. Smalley, *Am. Sci.* 324 (July-August 1997).
19. S. Iijima and T. Ichihashi, *Nature*, 363, 603 (1993).
20. D. S. Bethune [et al.], *Nature*, 363, 60S (1993).
21. W. A. de Heer, A. Chatelain and D. *Ugarte, Sci.*, 270, 1179 (1995).
22. P. G. Collins and A. Zettl, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1969 (1996).
23. H. J. Dai [et al.], *Nature*, 384, 147 (1996).
24. C. E. Harris, M. J. Stuart and H. R. Gray, Emerging Materials for Revolutionary Aerospace Vehicle Structures and Propulsion Systems, *SAMPE J.,* 38(6), 33-43, 2002.
25. http://www.netcomposites.com/news.asp?1394. October 4, 2002, pp. 1-3.
26. C. A. Grimes, Titania Nanotubes Sense Hydrogen 1500 Times Better, *AM&P*, p. 20, October 2003.
27. New Type of Nanotube Made of Gold or Silver, p. 2, Febru-

ary 5, 2004, *Angewandte Chemie,* December 2003.
28. Synthesis of New Type of Nanotube, *JETRO,* April 1997, p. 16.
29. A. Zettl, Boron Nitride Nanotubes, *AM&P,* pp. 25-29,2002, www.lbLgov.
30. T. Malik, Nucleotide Nanotubes, Scientific American, December 2002, p. 36.
31. Nano-Welding Creates Tiny Junctions, *Rensselaer Polytechnic Institute:* Campus News, p. 1, September 9, 2002.
32. How to Weld Carbon Nanotubes, *Mach. Des.,* January 9, 2003, p. 32.
33. D. Talbot, «The Nano Sorter, Technol.,» *Rev*. (July/August 2003), p. 26.
34. *Science News*, October 5, 2002.
35. G.-D. Zhan [et al.], *Appl. Phys. Lett*., 83, 1228 (2003).
36. www.appliednanotech.com. *Mach. Des*. (18 September 2003), pp. 35-37.
37. Nanotubes for Better TV Screens, CSIRO Molecular Science, Sydney, *Australia Mach. Des*., May 2000, p. 56.
38. Pop! Goes the Nanotube, *Mach. Des.,* July 11, 2002, p. 24.
39. «Carbon Nanotubes Emit Light,» (May 6, 2003), netcomposites.com/news. asp?1661, p. 1.
40. D. Scrivastava, «Switching Rectification in Carbon-Nanotube Junctions, «*NASA Tech Briefs* (October 2003), pp. 48-50.
41. «Nanotubes Demonstrate Unique Electrical Properties, «*Mach. Des*. (20 August, 1998), p. 51.
42. J. Li, Carbon Nanotubes Replace Copper in Electronic Chips,» *AM&P* (July 2003), pp. 16-17.
43. J. R. Minkel, «Barrier-Free Nanotubes, Scientific American,» (October 2003), pp. 36.
44. «Nanotube Circuitry, Nano Letters,» (January 2004), p. 1, http:/ /link.abpi.net/ l.php?20040108A2.
45. D. Rotman, «The Nanotube Computer, Technol. Rev.,» (March 2002), pp. 36-45.
46. P. E. Ross, «Tiny Ventures, Red Herring,» (August 2002), pp. 56-59.
47. E. Mapleston, «Nanotechnology Will Change the World for the Better, One Hopes, Modern Plastics,» (July 2004), pp. 32-36.

# المراجع


Bronikowski, M. and B. Hunt, «Block Copolymers as Templates for Arrays of Carbon Nanotubes.,» *NASA Tech Briefs*: April 2003, pp. 56-57.

"Composites: Resins, Filler, Reinforcements, Natural Fibers and Nanocomposites,» http://www.netcomposites.com/netcommerce_features.asp ?730;

*«Composites Week,»* 6 (27), 4, 2004.

Delzeit, L. D. and Delzeit, C. «Improved Method of Purifying Carbon Nanotubes.,» *NASA Tech Briefs*: July 2004, p. 46.

Delzeit, L. D. «Patterned Growth of Carbon Nanotubes or Nanofibers.,» *NASA Tech Briefs*: July 2004, pp. 46-47.

Fan, J. and M. Wan.,» Synthesis, Characterizations, and Physical Properties of Carbon Nanotubes Coated by Conducting Polypyrole.,» *J. Appl. Polymer Sci.,* 74, 2605, 1999.

Farley, P., «Solar-Cell Rollout.,» *Technol. Rev.*: July / August 2004, pp. 35-40

Fischer, J. E. and H. Dai. «Metallic Resistivity in Crystalline Ropes of Single-Wall Carbon Nanotubes.,» *Phys. Rev.*: B, 55, R4921, 1997.

Gao, G., Cagin, T., and Goddard, W.A., III, Energetics, Structure, Thermodynamics and Mechanical Properties of Nanotubes, *Nanotechnology,* 9, 183, 1998.

Grobert, N., Novel Carbon Nanostructures, Ph.D. thesis, University of Sussex, 2000.

Halicioglu, T., Stress Calculations for Carbon Nanotubes, *Thin Solid Films*, 312, 11-14, 1998.

http://www.cmp-cientifica.com.

Hunt, B., Choi, D., Hoenk, M., Kowalczyk, R., and Noca, F, Growing Carbon Nanotubes Aligned with Patterns, *NASA Tech Briefs,* October 2002, pp. 52-53.

Lower Conductivity in Nanotubes Composites, http://www.netcomposites.com/ news.asp?1874, p. 1, accessed November 18, 2003.

Mann, C. «Near-Term Nanotech.,» *Technol. Rev*: July/ August 2004, p. 22.

«New Carbon Nanotube Composites with Significantly Improved Electron Emission Properties.,» http://www.netcomposites.-com/news.asp?1414. p. 1. Accessed 21 October, 2002.

Osawa, E. (ed.). *Perspectives of Fullerene Nanotechnology*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002.

Stix, G., Breaking the Mold, *Scientific American,* July 2002, pp. 34-35.

J. D. Wilson, E. G. Wintucky and C. L. Kory. «Making Carbon-Nanotube Arrays Using Block Copolymers: Part 2.,» *NASA Tech Briefs*: January 2004, pp. 42–43.

Xu, C. L. and B. Q. Wei. «Fabrication of Aluminum-Carbon Nanotube Composites and Their Electrical Properties.,» *Carbon*, 37, 1999, 855-858.

Yakobson, B. I., C. J. Brabec and J. Bernhole. «Nanomechanics of Carbon Tubes: Instabilities Beyond Linear Response.,» *Phys. Rev. Lett*., 76(14), 1996, 2511-2514.

# 8

# المواد المتدرِّجة وظيفياً

## تقديم

في المادة المتدرِّجة وظيفياً (Functionally Gradient Material) (FGM)، يتغيّر التركيب والبنية تدريجياً من نقطة إلى أخرى في المادة، وهذا يؤدّي إلى تغيُّر مُرافِق في خواص المادة. وبتطبيق الإمكانات الكثيرة التي ينطوي عليها مفهوم المواد المتدرّجة وظيفياً، يُتوقَّع أن تتحسَّن المواد، وأن تظهر وظائف جديدة لها.

اقتُرح مفهوم المواد المتدرِّجة وظيفياً أول مرة في عام 1984 في مختبرات الفضاء الوطنية في اليابان (Japan's National Aerospace Laboratory) بغية تحضير مواد مقاومة للحرارة يمكن استخدامها، ليس في البُنى الفضائية ومفاعلات الاندماج فحسب، بل في نظم مرْكَبات الفضاء المستقبلية. وفي عام 1987، بدأ مشروع وطني شارك فيه 17 معهد بحث حكومي وجامعة وشركة[3][1]، ودعمته وكالة العلوم والتقانة اليابانية (Japanese Science and Technology Agency)، تحت اسم «بحث في التقانة الأساسية لتطوير مواد متدرِّجة وظيفياً لإرخاء الإجهاد الحراري».

# تعريف وتصميم المواد المتدرّجة وظيفياً

## تعريف

تتألف المواد المتدرِّجة وظيفياً عموماً من مكوِّنات مادية مختلفة من قبيل السيراميكات والمعادن. لذا تُعتبر هذه المواد مواد مركَّبة ذات صفة ميكرويّة غير متجانسة. وتميِّزها التغيُّرات المتدرِّجة في بنيتها الميكرويّة من المواد المركَّبة العادية، وتؤدّي تغيُّرات التركيب المستمرة مكانياً إلى تدرُّجات في خواص تلك المواد. ويُظهر الشكل 8 ـ 1 رسماً توضيحياً للاختلافات في البنية الميكرويّة والخواص بين المواد المتدرِّجة وظيفياً والمواد المركَّبة العادية.

| المواد | مثال | مادة متدرجة وظيفيا | مادة غير متدرجة وظيفيا |
|---|---|---|---|
| الوظيفة \ الخاصية | المقاومة الميكانيكية (1)<br>الناقلية الحرارية (2) | (1) (2) | (1) (2) |
| البنية \ النسيج | العناصر المكوّنة:<br>سيراميك (○)<br>معدن (●)<br>ليف (◇ +)<br>مسام مكروي (o) | | |

**الشكل 8 ـ 1: خصائص المواد المتدرجة وظيفياً[4].**

## تصميم المواد المتدرِّجة وظيفياً

عند النظر في تصميم مادة متدرِّجة وظيفياً يجب الأخذ في الحسبان الظروف التي سوف تخضع لها في التطبيق العملي. وهذا يقتضي انتقاء مجموعة المواد المثلى لتخفيف الإجهاد الحراري، وتحديد التوزُّع الأمثلي للتركيب النسبي من المواد الملائمة لظروف الإنتاج، وتحديد البُنى الميكرويّة المثلى للمواد المستخدمة.

عموماً، قُدِّرت أعلى درجة حرارة على سطح المرْكَبة الفضائية حين عودتها ودخولها جو الأرض بما يصل حتى 1800 مْ[5]. لذا يجب أن تتحمل المواد السطحية درجات حرارة تصل حتى 1800 مْ، مع تدرُّج في درجة الحرارة يساوي 1300 مْ. لذا يجب أن تتصف المادة بمقاومة للحرارة والأكسدة ملائمة في الطبقة السطحية، وبمتانة ميكانيكية في السطح البارد، وبإرخاء فاعل للإجهاد الحراري عبر المادة.

لتحقيق هذه المتطلبات، كانت الفكرة الوحيدة المقترحة للمادة المتدرِّجة وظيفياً هي تحضير مادة مركَّبة جديدة باستخدام سيراميكات مقاومة للحرارة في جانب الحرارة العالية، ومعادن متينة مع ناقلية حرارية عالية في الجانب المنخفض الحرارة، مع تغيُّرات تركيب متدرِّجة من السيراميك إلى المعدن وفق المبيّن في الشكل 8 ـ 1. ويمكن ضبط عامل التمدُّد الحراري في هذه البنية من خلال التحكُّم بالبنية الميكرويّة للتركيب وبنسبة المسامات في الوسَط ما بين السطحين الداخلي والخارجي.

استمرت المشاريع والدراسات المذكورة آنفاً للبحث في المواد المتدرّجة وظيفياً وتطويرها على مدى الثماني عشرة سنة السابقة، وشارك فيها مختصون في تصميم المواد وقواعد بياناتها ومعالجتها واختبارها وتقييمها.

حين تصميم المواد السيراميكية/ المعدنية المتدرِّجة وظيفياً لاستخدامها كمواد إنشائية أو مكوِّنات أخرى، فإن معرفة الإجهاد المتبقّي في المادة ضروري، ليس لدرء التشوُّه والتصدّع غير المرغوب فيهما فقط، بل لضمان وثوقية عالية للمنتجات أيضاً. وقد كان الغرض من دراسة أجراها فوكوي (Fukui) وزميله[6] معاينة الإجهادات الحرارية المتبقّية في المستوى الجَسِيم في حلقات من المواد المتدرِّجة وظيفياً المصنوعة من الـ Al-SiC، نظرياً وتجريبياً.

فمن المعروف أن تشغيل تلك الحلقات شديد الصعوبة، بسبب جُسيْمات الـ SiC الموزعة فيها، ولأن التسخين الناجم عن الخراطة يؤدّي إلى إجهادات حرارية متبقية أخرى. لذا لم يستطع هذان الباحثان الاعتماد في تجاربهما على تقنيات التجريب الشائعة المعروفة بطريقة ساك[7] (Sack). فدفعهما هذا إلى اعتماد طريقة قطع بسيطة وجيدة يقاس فيها التشوّه بعد قص الحلقة عند مقطع عرضاني واحد، ثم تُحدَّد حالة الإجهاد الأولية بحل مسألة عكسية.

صبَّ فوكوي وزميله بنجاح السبيكة Duralcan F3D.20S المكوَّنة من المادة المركَّبة الرئيسة ألمنيوم ـ 20 في المئة كربيد السليكون على شكل حلقات من المادة المتدرِّجة وظيفياً Al-SiC بطريقة الطرد المركزي. واتصفت تلك الحلقات بنسبة حجمية للـ SiC تغيَّرت من 0 في المئة عند السطح الداخلي حتى 43 في المئة عند السطح الخارجي.

ووجدا تطابقاً تاماً بين النتائج النظرية والتجريبية. وتبيَّن لهما أن الإجهاد المتبقّي يمكن أن يتولَّد من تبريد مقداره 140 كلفن، من درجة حرارة تساوي نصف درجة حرارة الانصهار وتوافق حالة انعدام الإجهاد، حتى درجة حرارة الغرفة. وتغيّرت الإجهادات الحلقية المتبقّية في الحلقة ضمن المجال من ـ50 (سالب) حتى +35 ميغا باسكال، ومن شدّ عند السطح الداخلي إلى ضغط عند السطح الخارجي بسبب التركيب المتدرّج. ومع زيادة سماكة الجدار أو تدرُّج التركيب، وُجد أن الإجهادات المتبقّية تزداد أيضاً.

يبيّن الشكل 8 ـ 2 مخططاً انسيابياً وضعه كيمورا (Kimura) وتودا[8] (Toda) لتصميم وتطوير مواد متدرِّجة وظيفياً بالتصليد بالانفراغ الكهربائي النبضي (Pulse Discharge Resistance Consolidation) مع تحكُّم بتدرُّج الحرارة. يمكن إيضاح سيرورة التصميم هذه بالعودة إلى مادة نموذجية لتطبيقات إرخاء الإجهاد

الحراري، هي المادة المتدرّجة وظيفياً التي تحتوي على متعدّد المعدن TiAl مع الزركونيا المستقرة جزئياً، التي تتصف بالخفة ومقاومة الشدّ الكبيرة. من الشروط التي فرضتها متطلبات الخدمة على تلك المادة المتدرِّجة وظيفياً تحقيق الكثافة التامة في الطبقات ذات النسب الحجمية الكبيرة من الزركونيا، إضافة إلى تشكيل متعدّد المعدن بحُبيْبات نانوية المقاس من خلال تبلور الـ TiAl غير المتبلور عند درجة حرارة منخفضة[11][9].




**الشكل 8 ـ 2: مخطط انسيابي لصنع مواد متدرّجة وظيفياً بالتصليد بالانفراغ الكهربائي النبضي المتحكَّم بتدرُّجه الحراري[9].**

لقد طوَّر كيمورا وتودا[8] طريقة جديدة لمعالجة المساحيق تسمح بتصميم وتصنيع مواد متدرّجة وظيفياً وتتألف من مكوّنات ذات معدّلات تكثُّف شديدة الاختلاف، وتمكِّن من التحكُّم بمسامية تصل حتى الكثافة التامة، وفي الإجهاد المتبقّي على طول تدرُّج المادة المركَّبة. وتتضمّن هذه الطريقة التصليد بالانفراغ الكهربائي النبضي مع تحكُّم بتدرُّج درجة الحرارة يأتي من استخدام قالب ذي شكل خارجي مصمّم خصّيصاً لهذا الغرض.

باستخدام هذه الطريقة، جرى بنجاح تحضير مواد متدرِّجة وظيفياً ذات تدرُّج من متعدّد المعدن TiAl ذي الحُبيْبات النانوية، حتى الزركونيا المستقرة جزئياً والتامة الكثافة. وقد جرى التكثيف التام للناتج عبر مقطعه العرضاني من دون أي تغيير مفاجئ في التركيب، وكانت له قيم لقساوة فيكرز، تزايدت من 650 في طبقة الـ TiAl النانوية البلّورات، حتى 1560 في طبقة الزركونيا، وفق تدرُّج نِسبهما في المزيج.

وكان هيرانو (Hirano) وياmada (Yamada) قد طوَّرا طريقة تصميم معاكسة تعمل كما يأتي: يُحدَّد **أولاً** شكل التدرُّج وشروط التسخين الحدية المطلوبة في تصميم بنية المادة المتدرِّجة وظيفياً، وتُنتقى المواد الملائمة مع طريقة الإنتاج من قاعدة بيانات. **ثانياً**، يُنتقى تابع توزُّع مثالي للتركيب لتحديد وتمثيل تركيب المادة المتدرِّج المطلوب، ويُحدَّد شكل التدرُّج بواسطة الموسّطات الخاصة به. **ثالثاً**، يُنتقى نموذج متوقع لخواص المادة اعتماداً على البنية الميكرويّة للمادة المتدرِّجة وظيفياً. ويتحقَّق ذلك بالحصول على البيانات المتعلقة بخواص مواد التركيب الأساسية التي سوف تُستخدم، من قاعدة بيانات خواص المواد. وفي الوقت نفسه، تُحدَّد موسّطات الشكل في النموذج الرياضي للبنية الميكرويّة. وباستخدام قيم

الخواص التي تنتج من تركيب اعتباطي للمادة يُكوَّن بهذه السيرورة، تُجرى تحاليل توزُّع درجات الحرارة والإجهاد الحراري. **رابعاً**، تُبذل محاولة لاشتقاق شكل التوزُّع التركيبي، إضافة إلى نسب مواد مثلى لتصغير الإجهاد النوعي (الإجهاد/ مقاومة المادة) بضبط موسّطات توزُّع التدرُّج ونسب المواد.

ونظراً إلى أن هذه المتطلبات تنطوي على حسابات متكررة للوصول إلى استمثال شامل للتصميم الأساسي، فإن التحليل الثلاثي الأبعاد باستخدام طريقة العناصر المنتهية (Finite Element) ليس عملياً بسبب مدة التحليل الطويلة. يُضاف إلى ذلك أن هذه الطريقة الجديدة للتحكُّم بالتوزُّع التركيبي الثلاثي الأبعاد ما زالت في بداية تطويرها. لذا، من الضروري، في ظروف التصميم هذه، الحصول على توزُّع تركيبي مثالي وحيد البعد في تصميم الشكل الأساسي للمادة المتدرِّجة وظيفياً قبل أن يصبح الاستمثال الثنائي الأبعاد ممكناً. وفي الوقت نفسه، في أثناء مرحلة التصميم التفصيلي، يجب بذل جهد كافٍ لتحليل المفاعيل غير الخطية لأشكال المادة الموجودة في الاستخدام الفعلي بغية تقييم مقاومة التعب الحراري، واستمثال التوزُّع التركيبي الموضعي باستخدام بيانات التوزُّع التركيبي الناتجة في مرحلة التصميم الأساسية.

على سبيل المثال، درس أوباتا (Obata) وزملاؤه[13] مواد مختلفة في أثناء تطوير حُجُب تتحمّل درجات حرارة عالية جداً خالية من الإجهاد الحراري. واختاروا تركيباً من الـ SiC الذي يتصف بمقاومة جيدة للأكسدة، وبمقاومة عالية للشدّ عند درجات الحرارة المرتفعة، والغرافيت الجيد التوافق مع مادة مركَّبة من الكربون/ كربون، الذي يُعتبر مادة إنشائية ويتصف بمُعَامل يونغ منخفض، وناقلية حرارية عالية. ووضعوا الـ SiC في أحد جانبي المادة المتدرِّجة

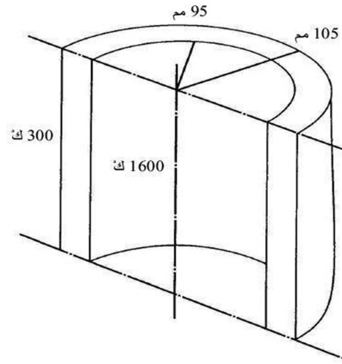
وظيفياً، والغرافيت في الجانب الآخر، مع تغيير التركيب باستمرار من جانب الـ SiC حتى جانب الغرافيت.

بُغية التوقّع بالتوزُّع التركيبي المتدرِّج المثالي لتحقيق الإجهاد الحراري الأصغري في المادة المتدرّجة وظيفياً المصنوعة من الـ /SiC C، تخيَّل أسطوانة لانهائية الطول، سماكة جدارها تساوي 10 ملم، ونصف قطرها الداخلي يساوي 95 مم، وأحد طرفيها مقيّد (انظر الشكل 8 ـ 3). حينما تكون درجة حرارة السطح الداخلي 1327 مْ، ودرجة حرارة السطح الخارجي 27 مْ، مع مجال تدرُّج حراري يساوي 1300 مْ، وإجهاد صفري في الاتجاه المحوري، يمكن حساب حالة الإجهاد في الأسطوانة. يُفترض أن الأسطوانة تحتوي على طَور SiC وحيد بعمق يساوي 1 ملم من السطح الداخلي، وعلى تركيب متدرِّج (خواص مختلفة) من SiC حتى C، ابتداءً من عمق 1 ملم حتى 10 ملم في اتجاه السماكة. ويُفترض أيضاً أن غشاء الـ SiC/C المتدرِّج وظيفياً يتصف بتوزُّع تركيبي متجانس في الاتجاه الداخلي (الاتجاه المعامد للسماكة).

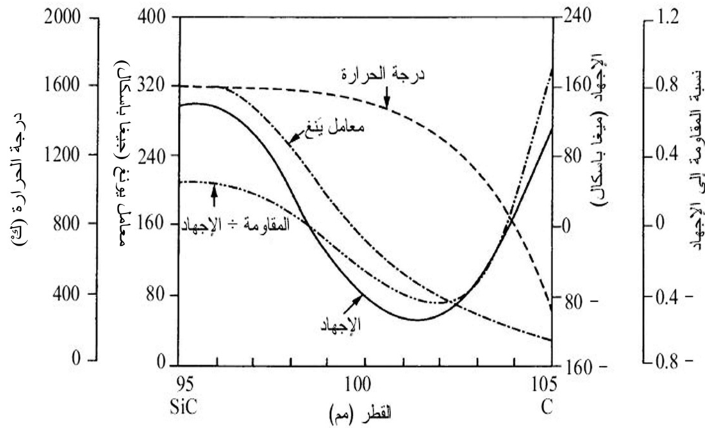
وحُدِّد الإجهاد الداخلي من أجل تراكيب متدرِّجة مختلفة وعند ظروف تدرُّج حراري مختلفة. يُظهر الشكل 8 ـ 4 توزُّعات الإجهاد ودرجة الحرارة ومُعامل يونغ عندما أصبحت نسبة المقاومة إلى الإجهاد الداخلي 1 أو أقل، في حين يُظهر الشكل 8 ـ 5 تدرُّج التركيب حينئذٍ. يتضح من الشكل 8 ـ 4 أنه يمكن لتدرُّج التركيب أن يُخفِّض الإجهاد الحراري إلى سُدس قيمته عند طَور الـ SiC الوحيد.

جرى تحضير مادة متدرّجة وظيفياً من الـ SiC/C ذات تركيب متدرّج مماثل لذاك المبين في الشكل 8 ـ 5 بتوضيع الأبخرة كيميائياً كالآتي: الغاز المستخدم هو المنظومة $SiCl_4 + C_3H_8 + H_2$، وكانت درجة حرارة عملية التحضير 1500 مْ. تُرِك تدفّق الغاز $C_3H_8$ ثابتاً،

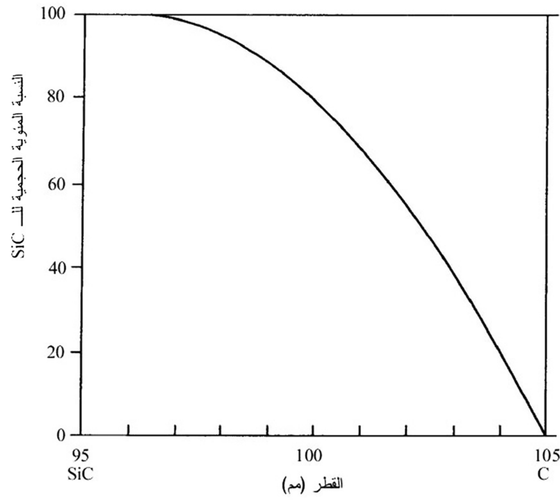
وجرى التحكُّم بالغاز $H_2$ الحامل للـ $SiCl_4$ بغية تغيير نسبة غاز المادة. تمكِّن هذه الطريقة من تحضير غشاء SiC/C متدرِّج وظيفياً، يتغير تركيبه باستمرار من Si إلى C على ركيزة غرافيتية. وكانت سماكة الغشاء الناتج نحو 1 ملم بعد توضيع دام 100 دقيقة.




**الشكل 8 ـ 3: نموذج أسطوانة لحساب الإجهاد الحراري في مادة مركَّبة SiC/C متدرّجة وظيفياً (في الداخل: SiC، وفي الخارج: C).**




**الشكل 8 ـ 4: تغيُّرات درجة الحرارة ومعامل يونغ والإجهاد ونسبة المقاومة إلى الإجهاد في المادة المركَّبة المتدرّجة وظيفياً SiC/C.**




**الشكل 8 ـ 5: توزُّع تركيب ملائم جرى التوقّع به حسابياً للمادة المتدرّجة وظيفياً** SiC/C. تراكيب المواد

انتقى ماتسوزاكي (Matsuzaki) وزملاؤه[14] متعدّد المعدن Ti-Al ليكون جانب التبريد (الجانب المنخفض درجة الحرارة، وهي مادة مغرية بسبب مقاومتها النوعية الجيدة (المقاومة/ الثقل النوعي)، عند درجات الحرارة العالية، التي تجعلها ملائمة للاستخدام كمادة إنشائية تتحمل درجات الحرارة العالية.

وعلى وجه الخصوص، تساوي درجة الحرارة التي تعمل عندها المادة TiAl 977 مْ، وهي أعلى بنحو 101 مْ من تلك التي تعمل عندها المادة Hastelloy X. إن استخدام الـ TiAl يمكن أن يساهم في رفع درجة الحرارة التي يتحملها سطح المواد المتدرِّجة وظيفياً، ومن ثمَّ، في تخفيض معدّل النقل الحراري إلى جانب التبريد من تلك المواد. يُظهر الجدول 8 ـ 1 قائمة بالخصائص التي يجب أن تتحقّق في مادة جانب التسخين (الجانب ذو درجة الحرارة العالية).

**الجدول 8 ـ 1**: مواد مرشحة للاستخدام في الجانب العالي الحرارة من المادة المتدرّجة وظيفياً.

| | $ZrO_2$ مثبت | $Al_2O_3$ | $HfO_2$ مثبت | TiC | HfC | $HfB_2$ | $MoSi_2$ | SiC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **الحماية الحرارية** | ++ | ++ | ++ | — | - | — | + | + |
| **مقاومة الأكسدة** | ++ | ++ | ++ | — | - | - | ++ | ++ |
| **مقاومة تسرب الأُكسجين** | — | ++ | — | + | + | ++ | ++ | ++ |
| **الاستقرار** الترموديناميكي | +- | + | +- | ++ | +- | +- | — | — |
| **المقاومة عند درجة الحرارة المحيطة** | ++ | + | + | + | + | + | + | + |
| **المقاومة عند درجة الحرارة المرتفعة** | - | + | - | + | + | + | + | ++ |

++: ممتازة، +: مقبولة، +- : في قيد الاختبار، -: سيئة، —: مرفوضة

تتصف المادة $Al_2O_3$ بخصائص كيميائية وحرارية وديناميكية جيدة تجعلها ملائمة للاستخدام كأعلى مادة سطحية في مادة متدرِّجة وظيفياً. وعلى وجه الخصوص يمكن تحسين خواصها الديناميكية بإضافة مادة مقوية إليها (كحُبيْبات أو شعيرات الـ SiC). لكن حين إضافة هذه المادة المقوية، من الضروري ضمان الاستقرار الحراري بين الـ TiAl والمادة المقوية.

تُستخدم الـ $Al_2O_3$ في أعلى سطح حار من المادة المتدرِّجة وظيفياً بسبب عزلها الحراري ومقاومتها للأكسدة والتآكل والحت عند درجات الحرارة العالية. ويُستخدم الـ SiC لتحسين خصائص المقاومة الديناميكية في المادة المتدرِّجة وظيفياً. وتُستخدم طبقة الـ TiC طبقة وسطى لدرء التفاعل المتبادل بين الـ SiC والـ TiAl، إضافة إلى أنها تُرخي التشوّه اللامرن للمادة المتدرِّجة وظيفياً في الأجواء الساخنة. ويمكن استخدام الـ TiC المستقرة كيميائياً على نحو فاعل مع

سيراميكات السليكون النشطة أو مع متعدّدات المعادن لتكوين مادة الجانب الساخن.

يمكِّن استخدام مواد متعدّدة المكوّنات في المادة المتدرّجة وظيفياً من إعطاء تلك المكوّنات وظائف مختلفة. وفي حين أن زيادة عدد المكوّنات تجعل تصميم المادة أشدّ تعقيداً، إلا أنها تعني حرية أكبر في التحكُّم بخواص المادة في المستوى الجَسيم. على سبيل المثال، في المادة المتدرّجة وظيفياً المكوّنة من أربع طبقات، تتحقَّق الحرية في التحكُّم بالخواص الحرارية والميكانيكية لمادة السطح العلوي ($Al_2O_3$-SiC) بتغيير مقدار الـ SiC، ويزيد كل من تغيير مقدار الـ TiC وأنماط توزعها من الحرية في التحكُّم بخواص المادة المتدرّجة وظيفياً كلها في المستوى الجَسيم. إن تطوير هذه المادة المتدرّجة وظيفياً المتعدّدة المكوّنات يمكِّن من تصميمها باستخدام طريقة التصميم بتحليل المسألة العكسية، وهي الهدف النهائي في مساعي تصميم تلك المواد. فهذه الطريقة تستدعي الحصول حسابياً على توزُّع خواص مثالي، يحقِّق الوظيفة المطلوبة وتحديد المواد التي سوف تُستخدم، وشكل التدرُّج في المادة المتدرّجة وظيفياً، وتوزُّع تركيبها وبنيتها الميكرويّة.

وحاول واتانابه (Watanabe) وزملاؤه[15] لدى جامعة طوكيو تحضير مادة متدرّجة وظيفياً من الزركونيا المثبّتة جزئياً والفولاذ غير القابل للصدأ من النوع 304 باستخدام تقنيات تعدين المسحوق. مُزج مسحوق الزركونيا المثبّتة جزئياً (0.05 ميكرون مقاس الحُبيْبة) مع مسحوق فولاذ SUS 304 (مقاس حُبيْبته يساوي 6 ميكرون) بحيث يعطيا تركيباً مستمر التغيُّر وفق تشكيلة تدرُّجية مصممة من قبل. وكُبِست المساحيق المكدسة تدرُّجياً، ثم لُبِّدت في الخلاء.

وبيَّنت نتائج قياسات مقاومة الكسر، والفحص التعديني،

وتصوير التشقّقات، باستخدام عيّنات أُخذت من المادة الملبّدة، أنه يمكن التحكُّم بالتقلُّص أو الرصّ المتدرِّج الناجم عن التلبيد، ويمكن تخفيض الإجهاد الحراري الذي يتولّد في المادة المرصوصة في أثناء التلبيد، وكلاهما ضروريان لإنتاج مادة مركَّبة متدرِّجة وظيفياً ذات مقاومة كسر كافية.

هكذا جرى تصنيع مادة مركَّبة سيراميكية معدنية متدرّجة الوظيفة من الزركونيا المثبّتة جزئياً والفولاذ غير القابل للصدأ، بتدرُّج تركيبي متحكَّم به له شكل الدرج، وذلك باستخدام سيرورة تعدين المسحوق.

واستُخدمت سيرورة تعدين المسحوق أيضاً، مع الإرخاء الحراري لهذا النوع من المادة المتدرّجة وظيفياً، لصنع منظومتين من الزركونيا المثبّتة جزئياً كمادة أولى، والموليبدن أو التنغستين كمادة ثانية[16].

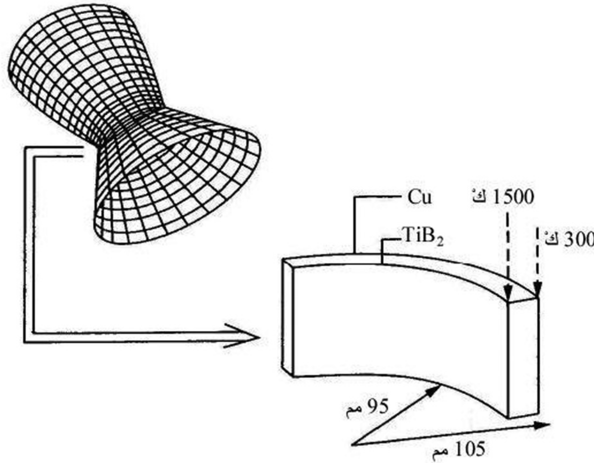
وابتكر فوكوشيما (Fukushima) وزملاؤه، لدى المعهد الوطني للمعادن، التقنية الأساسية لتحضير طلاءات متدرّجة مكوّنة من خليطة معدنية أساسها النيكل (عدت إلى المقالة الموافقة) وسيراميك أساسه الـ $ZrO_2$، وذلك بواسطة البخ البلازمي، حيث استخدموا مشعلاً مزدوجاً في الهواء، وقاموا بتغيير موسّطات البخ[17].

واستقصى شيمودا (Shimoda) وزملاؤه لدى شركة الفولاذ اليابانية سيرورةً لصنع طلاء متدرِّج التركيب باستخدام حاقن واحد ذي أربع فوهات، واعتمدت السيرورة على طريقة البخ بالبلازما المنخفضة الضغط[18]. فقد استقصوا المنظومة $ZrO_2$-NiCr بالتحكُّم بإدخال مسحوقَي السيراميك والمعدن إلى قوس البلازما في الوقت نفسه بواسطة حاقن واحد. تبدو هاتان السيرورتان، أي التصفيح

بصفائح رقيقة والبخ البلازمي المنخفض الضغط، ملائمتين للإنتاج الكمي وللإنشاءات المعقّدة الكبيرة.

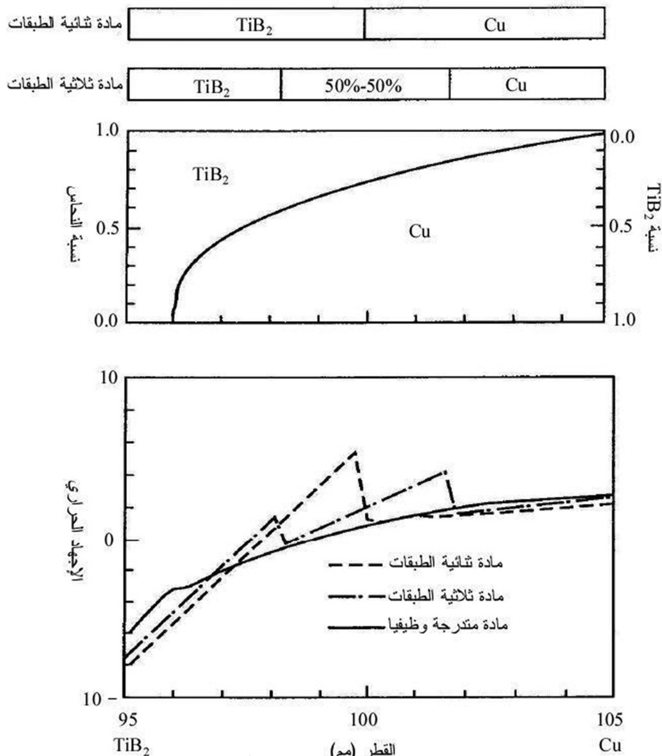
وباستخدام خصائص تفاعل التحضير العالي درجة الحرارة والذاتي الانتشار (Self-Propagating High-Temperature Synthesis)، الذي يتضمّن درجة حرارة وسرعة تفاعل عاليتين جداً، ومعدّل تسخين عالٍ، تمكِّن طريقة التصليد بالاحتراق من التغيير المتدرِّج لتركيب المعدن. هنا، يبقى ترتيب المكوّنات الأولي، الموجود في الجسم الغض، في الحاضنة السيراميكية، وينجم هذا عن الانتشار السريع لموجة التفاعل بالاحتراق.

ودرس ساتا (Sata) وزملاؤه[19] المنظومة $TiB_2$-Cu، ونمذجوا أسطوانة لانهائية، لاستخدامها في حجرة الوقود الدافع لصاروخ، يساوي قطرها الخارجي 105 مم، وقطرها الداخلي 95 مم، وفق المبيّن في الشكل 8 ـ 6.




**الشكل 8 ـ 6: نموذج لحجرة الدفع مع ظروف درجة الحرارة.**

لقد افترضوا أن الحجرة تتعرض إلى فرق في درجة الحرارة يساوي 1200 مْ عبر سماكة الجدار. وصمَّموا المادة المركَّبة المعدنية السيراميكية باستخدام بيانات حرارية وميكانيكية. وفق المُبيّن في الشكل 8 ـ 7، وفي حالة المادتين الثنائية والثلاثية الطبقات، تبقى فجوات إجهاد كبيرة في ما بين الطبقات تؤدّي إلى تصدّع المادتين الملصوقتين أو المطليتين. أما في عيّنة المادة المتدرّجة وظيفياً، فتختفي فجوات الإجهاد تلك، وتختفي معها متاعبها.




**الشكل 8 ـ 7: تغيُّر التركيب (المنحني العلوي)/ الإجهاد الحراري (المنحني السفلي) مع نصف القطر في حجرة دفع صاروخ مصنوعة من المادة المتدرجة وظيفياً** TiB2-Cu[19].

مزج فريق ساتا مساحيق تيتانيوم وبورون ونحاس بنِسَب مزج متغيِّرة كالدَرَج. وكُدِّست مساحيق المزيج في وعاء مع خطوات لتغيير التركيب تساوي على التتالي 2، 4، 6، 11، 16، 21 وحدة، وكُبس المزيج وأُشعل في نظام تحميل وحيد المحور يُشغَّل بنابض، أو في مِحَم. بعد تلك العمليات تشكَّلت مواد مكوّنة من طبقات ذات تراكيب محدّدة متغيِّرة من النحاس حتى $TiB_2$ بشكل دَرَجي.

وصُنعت مادة متدرّجة وظيفياً أخرى مكوّنة من المنظومة TiC-Ni باستخدام سيرورتَي التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار والكبس الحار المتساوي الضغط. طوَّر هذه الطريقة مياموتو (Miyamoto) وزملاؤه[20]، وهي كما يأتي: وُضع الجسم المكبوس ضمن محفظة زجاجية مخلاَّة من الهواء مُحْكَمة الإغلاق (تماماً مثل طريقة المحفظة في سيرورة الكبس الحار المتساوي الضغط)، ووُضعت المحفظة في بوتقة مملوءة بوسيط احتراق. وابتدأ التفاعل بالتسخين الناجم عن وسيط الاحتراق في جو من غاز الأرغون عند ضغط يقل عن 100 ميغا باسكال.

يُعدُّ البيريليوم وخلائط البيريليوم والـ $Be_2C$ والكربون مكوِّنات لفئة المواد المركَّبة $Be/Be_2C/C$ النانوية الطَور التي يمكن تركيبها وجعلها متدرِّجة وظيفياً لتلائم طيفاً من التطبيقات المختلفة. وفي إحدى الحالات الشائعة، تتكوَّن مادة مركَّبة من هذا النوع من طبقة أولى من البيريليوم النقي أو خليطة بيريليوم، وطبقة ثانية من $Be_2C$، وطبقة ثالثة من كربون ملبّد نانوي الطَور مشتق من فُلِّرينات وأنابيب نانوية. وتصِل بين الطبقات الثلاث بُنى متداخلة إسفنجية البنية.

تشابه هذه المواد المركَّبة من $Be/Be_2C/C$ المواد المركَّبة المتدرِّجة وظيفياً من الألماس/ Co /WC باستثناء **(1)** أنه قد استُعيض عن التنغستين والكوبالت بالبيريليوم وخلائطه، **(2)** واستُعيض عن

الألماس بالكربون الملبد المشتق من الفُلِّرينات والأنابيب النانوية (في خيار آخر يمكن تكوين ألماس/ $Be_2C/C$ /Be). ونظراً إلى أن البيريليوم أخفّ من التنغستين والكوبالت، فإن وزن مواد الـ /Be $Be_2C/C$ أقل من وزن نظيراتها من الألماس/ Co/WC. هذا علاوةً على أن الكربون النانوي الطَور يتصف بقساوة تماثل تلك التي للألماس تقريباً.

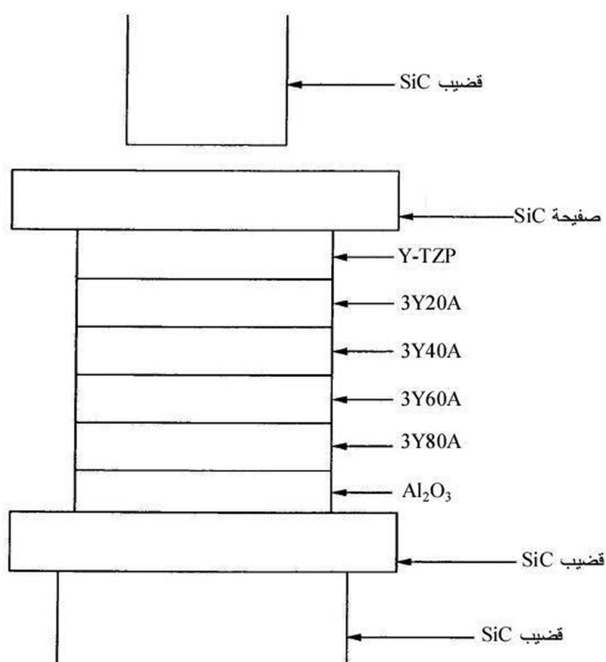
تُعدُّ الـ WC/Co أمتن المواد، وهي تُستخدم على نطاق واسع في التثقيب والحفر والتشغيل. إلا أن ثِقَل التنغستين (أي اتصافه بكتلة ذريّة وكثافة كتلية عاليتين)، يجعله غير مرغوب فيه بالتطبيقات التي تفضّل خفة الوزن. والبيريليوم هو أخفّ العناصر المتينة، إلا أن متانته تقل عن تلك التي للخليطة WC/Co. أما البيريليوم المقوّى بالكربون النانوي الطَور، فهو أمتن كثيراً من البيريليوم النقي ومن خلائط البيريليوم. يُضاف إلى ذلك أن الكربون النانوي الطَور يتصف بنسبة مقاومة إلى وزن لا نظير لها.

إن المواد المركَّبة من الـ $Be/Be_2C/C$ مغرية على وجه الخصوص للتطبيقات الأرضية والجوية الفضائية التي تتطلب خفة وزن إلى جانب مقاومة ومتانة الألماس/ Co /WC العاليتين. يمكن تضمين تلك المواد في مكوّنات متنوعة، منها أدوات القطع والمحامل وفوهات النفث في الصواريخ والحُجُب. يُضاف إلى ذلك، أنه نظراً إلى أن البيريليوم والكربون فاعلَين في تبطيء النيوترونات (Neutron Moderators)، يمكن لمواد الـ $Be/Be_2C/C$ أن تكون مغرية لبعض التطبيقات النووية[21].

وصنع ناغانو (Nagano) وواكاي[22] (Wakai) مادة متدرِّجة وظيفياً من $ZrO_2$-$Al_2O_3$ بالربط التغلغلي الفائق اللّدانة. وكانت ظروف العمل كما يأتي: درجة حرارة ربط تساوي 1550 مْ خلال مدة 30

دقيقة، وانفعالات تساوي 17 و33 و50 في المئة. وتحقَّق الربط الكامل في جميع تلك الظروف. أما طريقة الربط فمبيّنة في الشكل 8 ـ 8، في حين أن الجدول 8 ـ 2 يُعطي تراكيب المواد ويلخص بعض خواصها.

اختلفت مقاومة الحَنِي الظاهرية للمادة المتدرّجة وظيفياً -$ZrO_2$- $Al_2O_3$ اختلافاً ملحوظاً تبعاً لاتجاه الإجهاد المطبق. وعندما كان جانب الإجهاد Y-TZP، كانت مقاومة الحَنِي الظاهرية في العيّنة (عند انفعال مقداره 50 في المئة) 1860 ميغا باسكال. وعندما كان جانب الإجهاد $Al_2O_3$، كانت مقاومة الانحناء الظاهرية (عند انفعال مقداره 50 في المئة) 330 ميغا باسكال.




**الشكل 8 ـ 8: رسم توضيحي لمجموعة الربط. (النسب معطاة في الجدول 8 ـ 2).**

**الجدول 8 ـ 2**: بعض خواص المواد

| المادة | $ZrO_2$ في المئةو | $Al_2O_3$ في المئةو | الكثافة (غ/سم$^3$) | مقاومة الحَنِي (ميغا باسكال) | مقاس الحُبيْبة (ميكرون) | معامل ينغ (جيغا باسكال) | معامل القص (جيغا باسكال) | مُعَامل التمدّد (1/مْ (×10 - 6)) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Y-TZP | 99.7 | | 6.05 | 750 | 0.59 | 200 | 76 | 12.0 |
| 3Y20A | 79.9 | 20.0 | 5.50 | 2300 | 0.77 | 250 | 97 | 11.2 |
| 3Y40A | 59.9 | 40.0 | 5.10 | 2300 | 0.79 | 300 | 119 | 10.4 |
| 3Y60A | 39.9 | 60.0 | 4.60 | 2000 | 0.80 | 335 | 134 | 9.94 |
| 3Y80A | 19.9 | 80.0 | 4.30 | 1200 | 1.06 | 370 | 150 | 9.48 |
| $Al_2O_3$ | | 92.0 | 3.53 | 360 | 4.77 | 280 | 113 | 8.71 |

## طرائق تصنيع المواد المتدرِّجة وظيفياً ومعالجتها

أُجري مقدار كبير من البحث والتطوير وإعداد النماذج الأولية والاختبار والتقييم في كل من المجتمع العلمي والصناعة لإنتاج مواد متدرِّجة وظيفياً لمختلف التطبيقات. وقد جرى إحصاء ما لا يقل عن 14 طريقة لصنع المواد المتدرّجة وظيفياً، ويمكن أن يكون ثمة أكثر من ذلك. تلك الطرائق هي:

**1** ـ مزج الشوارد الديناميكي (Dynamic Ion Mixing)

**2** ـ الخلط والتغطية الليزريان (Laser Alloying an Cladding)

**3** ـ معالجة المساحيق بالصب الردغي (صبّ المعلّق) slip casting والتلبيد العديم الضغط (Pressureless Sintering)

**4** ـ صب الشريط (Tape Casting)

**5** ـ الترذيذ التفاعلي (Reactive Sputtering)

**6** ـ التحضير العالي درجة الحرارة والذاتي الانتشار (Self-Synthesis Propagating High-Temperature) والكبس الحار المتساوي الضغط (Hot Isostatic Pressing).

**7** ـ التلبيد ببلازما الشرر l (Spark Pasma Sintering)

**8** ـ توضيع بالتهجير الكهربائي (Electrophoretic Deposition)

**9** ـ المُراكمة بالترقيد (Sedimentation)

**10** ـ توضيع المسحوق المتعدّد المكوّنات (Multi-Ingredient Powder Deposit).

**11** ـ تعدين المسحوق (Powder Metallurgy)

**12** ـ البخ البلازمي (Plasma spray)

**13** ـ التشكيل الفائق اللّدانة (Superplastic Forming) والربط التغلغلي (Diffusion Bonding)

**14** ـ توضيع الأبخرة كيميائياً (Chemical Vapor Deposition).

**مزج الشوارد الديناميكي**: جرى تحضير أغشية $ZrO_2$ على شكل مادة متدرِّجة وظيفياً تتغيّر من Cu حتى $ZrO_2$. حيث حُضِّرت الزركونيا المثبّتة جزئياً وأغشية المادة المتدرِّجة وظيفياً على ركيزة من النحاس بسيرورة مزج ديناميكية[23]. وكان التشعيع بشوارد الأُكسجين ضروري لتشكيل أغشية المادة المتدرّجة وظيفياً $ZrO_2$-Cu، لأن الأغشية التي وُضِّعت من دون تشعيع بشوارد الأُكسجين تقشّرت بسهولة من الركيزة في أثناء مرحلة التوضيع. وجرى التحكُّم بمعدلَي التوضيع بالحزمة الإلكترونية للنحاس والزركونيا كل على حدة. وحُلِّلت بنية المادة المتدرّجة باستخدام مطيافية الإلكترون المولّدة بالأشعّة السينية ومجهر النفاذ الإلكتروني. ووجد ناكيشيما[23] (Nakeshima) وزملاؤه أن حُبيْبات النحاس والزركونيا البلّورية امتزجت جيداً في طبقات المادة الناتجة. وفُحِصت المقاومة الحرارية للمادة المتدرّجة وظيفياً باستخدام اختبار التسخين، حيث سُخِّن سطح

الغشاء بنفث بلازما الأرغون والهيدروجين، ولم يُشاهد أي صدع على سطح المادة بعد الاختبار. لكن التصدّعات كانت موجودة في غشاء الزركونيا المثبّتة جزئياً الموضَّع على ركيزة النحاس (في حالة غياب طبقة التدرّج الوظيفي).

**الخلط والتغطية الليزريان**: توفّر تقنية خلط وتغطية السطح وحقن الجُسيْمات طريقة جيدة لإنتاج أنواع معيّنة من المواد المتدرِّجة وظيفياً. ثمة تطبيقات جوية فضائية للمادة المنتجة بهذه الطريقة، حيث من المرغوب فيه إرخاء الإجهادات الحرارية التي يمكن أن تؤدّي إلى التكسُّر حين حصول فارق حراري كبير بين طرفَي القطعة. لتكوين تدرُّجات ناظمية على سطح الركيزة، يمكن توضيع طبقات مخلوطة متعاقبة تامة التراكب باستخدام مزائج مساحيق بنسب متزايدة من مكوّن واحد أو أكثر لتحقيق التركيب المتدرّج. يؤثّر التحكُّم بنسبة الخلط ابتداء من الركيزة في تركيب الطبقة الأولى، ويؤثّر التحكُّم بنسبة خلط كل طبقة في تركيب الطبقة التي تليها. تعطي هذه التقنية سلسلة من الطبقات المنفصلة من حيث الجوهر من دون تدرج مستمر للتركيب.

واتبع عبود[24] (Abboud) وزملاؤه نهجين في معالجة المواد المتدرِّجة وظيفياً هما: **(1)** الخلط السطحي لركيزة مكوَّنة من خليطة معظمها من التيتانيوم، باستخدام تغذية من مسحوق الألمنيوم، **(2)** وتغطية ركيزة تيتانيوم تجارية النقاوة باستخدام مزيج مسحوق الألمنيوم مع مسحوق الخليطة Ti-6Al-4V . ووجدوا أن التغطية التي تتضمّن نسب منخفضة توفّر نهجاً أفضل لإنتاج طبقات عدّة منفصلة ذات محتوى متزايد من الألمنيوم، من تلك المنتجة بالخلط المقترن بنسب مزج أكبر. استُخدم في تقنية التغطية هذه مزيج مسحوقي الألمنيوم والخليطة Ti-6Al-4V (نسبة وزنية)، وكان التدرّج منخفضاً،

وتكونت طبقات عدّة منفصلة التركيب تغيّر فيها محتوى الألمنيوم من 10.5 في المئة و(تكافئ نحو 18 في المئةذ) حتى 34.5 في المئة و(تكافئ نحو 48 في المئةذ).

واستخدم جاسم (Jasim) ورولينغز (Rawlings) ووست[25] (West) تقنية الحقن بمسحوق من مزيج معدني سيراميكي، تضم هذه التقنية سيرورات الخلط الليزري والتغطية والحقن لدراسة جدوى استخدام ليزر ثاني أُكسيد الكربون المستمر الموجة لإنتاج مادة متدرّجة وظيفياً. فقد استخدموا ركيزة من خلائط النيكل وليزر ثاني أُكسيد الكربون قدرته 2 كيلو واط لصنع مسارات تغطية مفردة وثلاثية تامة التراكب باستخدام مزيج مساحيق مكوّنة من ألمنيوم ـ 10 في المئةو كربيد السليكون، وألمنيوم ـ 30 في المئةو كربيد السليكون، وألمنيوم ـ 50 في المئةو كربيد السليكون.

وبيَّنوا أنه يمكن صنع مادة متدرّجة وظيفياً بالمعالجة الليزرية لمسحوق مزيج الـ Al-SiC على ركيزة من خلائط النيكل (IN 625)، وأنه يمكن توضيع ثلاثة مسارات متعاقبة لتكوين طيف واسع من التشكيلات، ابتداءً من المناطق الداخلية باتجاه المناطق الخارجية. إلا أن التغيّرات المرافقة للعملية في البنية الميكرويّة عبر المادة المتدرّجة وظيفياً التي تبلغ سماكتها 3 ملم لم تكن مُرضية تماماً. وعلى وجه الخصوص، وجدوا أن من الصعب الاحتفاظ بنسبة كافية من الـ $SiC_p$ غير تلك التي في الطبقة الأخيرة من المادة المتدرّجة وظيفياً. يُضاف إلى ذلك أنه بسبب عدد الإضافات الخالطة في الركيزة، كانت البُنى الميكرويّة معقّدة وصعبة التعليل، وبينّت النتائج أن ثمة حاجة إلى التمحيص المفصّل في المكوّنات عند تصميم نظام متعدّد المكوّنات.

**صبّ المعلّق (الرداغ) والتلبيد العديم الضغط**: فحص تاكيبه (Takibe) وموريناغا[26] (Morinaga) منظومة الزركونيا الرباعية البلّورات والنيكل بوصفها نموذجاً لصنع مواد متدرّجة وظيفياً بتقنية

معالجة المسحوق باستخدام صبّ المعلّق والتلبيد العديم الضغط. وقد وجدوا أن مفاتيح التصنيع الناجح هي: **(1)** جُسيْمات سيراميك ومعدن جيدة الانتشار ضمن المعلّق، **(2)** وبُنى ميكرويّة طبقية مضبوطة في المادة المرصوصة الغضّة، **(3)** وتجنب تصدّع المسحوق المرصوص بإجهادات التلبيد والتجفيف[27].

وصنعوا مرصوصاً غضاً متعدّد الطبقات من $ZrO_2$-Ni ذا تركيب دَرَجي (له شكل الدَرَج) جرى تلبيده في جو من شوارد الأرغون الموجبة. والمفتاح الأخير للتصنيع الناجح كان جعل فروق النفوذية وأقطار المسامات بين الطبقات المتجاورة أصغرية في الجسم المرصوص الغض المتعدّد الطبقات لدرء التصدّع في أثناء التجفيف في الجو المحيط.

ونجح مورِيناغا وزملاؤه[28] أيضاً في صنع مادة متدرّجة وظيفياً من $Al_2O_3$/W باستخدام طريقة صبّ المعلّق. وحصلوا على مادة متدرّجة ذات تركيب متغير باستمرار، وذلك من خلال التحكُّم بمعدّل هبوط الجُسيْمات الناعمة، الذي يعتمد على الثقل النوعي وعلى حجم الحُبيْبة، في سيرورة تسميك القوام في طريقة صبّ المعلّق. حينما استخدموا كثافة معلّق رقيق القوام تساوي 5 أو 10 في المئة، انفصلت طبقتا الـ $Al_2O_3$ والـ W، وهذا ما يؤكد تكوُّن طبقتين صافيتين مستمرتين مائلتين. في الماضي، استُخدم توضيع البخار وزرع الشوارد والتغلغل لصنع المواد المتدرّجة، إلا أن طريقة صبّ المعلّق هذه استحوذت على الاهتمام، ومكَّنت من صنع مواد متدرّجة متنوعة، باستخدام معلّق رقيق القوام ومواد خام ذات جُسيْمات ناعمة مع كثافات نوعية وحجوم حُبيْبية مختلفة.

وتزيد إضافة الضغط في أثناء صبّ المعلّق معدّل توضُّع المادة، وتمكِّن من صنع قِطَع أكبر حجماً. وهذا ما بيَّنته دراسة أجراها

غرازِّيني (Grazzini) وويلكنسون[29] (Wilkinson)، اللذان اشتمل عملهما على إيجاد مواد مركَّبة كبيرة الكتلة من $Al_2O_3$ و$Al_2O_3$-Si بصبّ المعلّق باستخدام كل من المعلّق المنتشر والمخثَّر اللذين جرى تحليلهما، وتحقّقت نتائج ممتازة حين استخدام المعلّق المتخثر، حيث لم تظهر تصدّعات بعد التجفيف. وقد وُجد أن مفعول الضغط تجلّى في زيادة كثافة الجسم الغض التي تبعتها زيادة في كثافته بعد الشيّ. يُضاف إلى ذلك تكوُّن بُنى ميكرويّة متجانسة في المادة المركَّبة برغم الفوارق الكبيرة في مقاسات الجُسيْمات المستخدمة.

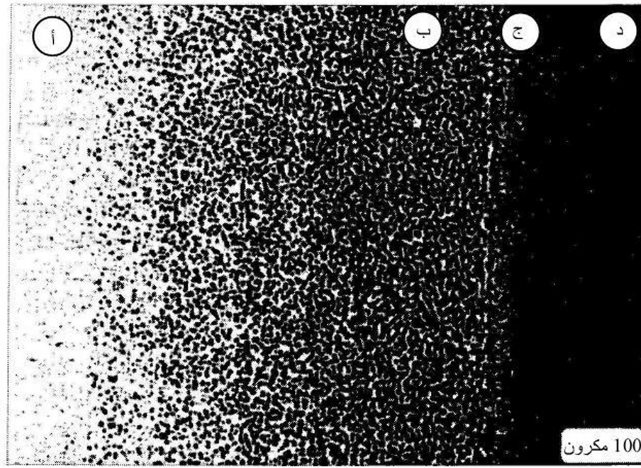
**الصب الشريطي**: استقصى أوداي[30] (O'Day) وزملاؤه الصبّ الشريطي للمواد السيراميكية الذي يوفّر مرونة التغيُّر المتدرّج للخواص الإلكترونية أو الإنشائية لمنظومتين مختلفتين بغية تحسين توافقهما. حيث اشتمل بحثهما على معالجة وصنع مواد متدرّجة وظيفياً من المادتين السيراميكيتين الإلكترونيتين $Ba(1\text{-}x)Sr(x)TiO_3$ و$Al_2O_3$، أو أُكسيد آخر. تُستخدم هذه المواد المركَّبة في نظم هوائيات الصفيفات الطَورية (Phased Array Antenna)، لذا ثمة متطلبات معيّنة يجب أن تتحقَّق في خواص المادة الكهربائية في مجال الأمواج الميكرويّة. لقد غُيِّر تركيب الأشرطة لتحقيق ثابت كهربائي متدرّج متزايد من قيمة ثابت الهواء (ثابت عزل =1) حتى الثابت الخاص بالسيراميك (ثابت عزل = 1500). هذا يسمح بنفاذ كبير جداً لأشعّة الأمواج الميكرويّة الواردة إلى الهوائي، إضافة إلى تبديد للطاقة وخسارة إقحام (Insertion Loss) صغريين في كامل دارة إزاحة طَور الموجة المستقبلة.

وطوَّر سابلجيك (Sabljic) وويلكنسون[31] سيرورة تستخدم الصبّ الشريطي والتصفيح لتشكيل مادة مركَّبة معدنية سيراميكية. إنه لمن المعروف أنه عند معالجة المواد المركَّبة المعدنية السيراميكية، غالباً ما تنجم مشاكل معقدة عن الفوارق الملحوظة في عامل التمدّد

الحراري. فالإجهادات التي تظهر بين طبقات المعدن والسيراميك يمكن أن تؤدّي في الأغلب إلى التفكّك الصفيحي. لذا طوَّرا مواد متدرّجة وظيفياً لتقليص تلك الفوارق عند ملتقى المعدن والسيراميك إلى حدها الأصغري. واستخدما سلسلة من الطبقات الرقيقة المشكَّلة بالصبّ الشريطي، وكان لكل طبقة تركيب من المعدن والسيراميك مختلف قليلاً عن الطبقتين المجاورتين لها. ثم جُمعت الطبقات معاً، وبعد التلبيد، أعطت انتقالاً تدريجياً من سطح سيراميكي صافٍ إلى سطح معدني صافٍ. وقد اختير الصبّ الشريطي لتشكيل الطبقات لأن المكوّنات نفسها يمكن أن تُستخدم عبر بُنية المادة المركَّبة، وهذا يسمح بدوره باستخدام جداول التصفيح نفسها والشَيّ في أثناء مرحلة التصنيع الأخيرة. وضُبط تركيب وسماكة الطبقات لتحقيق التركيب المتدرّج المطلوب.

وقام أتاراشيا (Atarashiya) وكوروكووا (Kurokowa) وناغاي (Nagai) وأودا[32] (Uda) بتقييم المنظومة المتدرّجة وظيفياً Ni-MgO باستخدام الـ Ni-NiO كحشوة وصل في التلبيد العديم الضغط. وقد تحقَّق وصل النيكل مع أُكسيد المغنيزيوم كلياً عند 1300 مْ باستخدام مادة متدرّجة وظيفياً من Ni-NiO. وكانت مقاومة الكسر في تلك الوصلات بين 72 و128 ميغا باسكال، مقارنةً بقيمة تتراوح بين 30 و60 ميغا باسكال في حالة الوصل العادي. واستُخدمت المادة المتدرّجة وظيفياً Ni-MgO لوصل المنظومة نفسها، فتحقَّقت مقاومة كسر تساوي 110 ميغا باسكال. وتحقّق التصاق جيد أيضاً حين وصل $Si_3N_4$ مع $Ni-Si_3N_4$. يُضاف إلى ذلك أنه جرى وصل حديد بنجاح مع مادة متدرّجة وظيفياً مكوّنة من Al-AlN عند درجة حرارة تساوي 650 مْ مدة 48 ساعة. إن فكرة استخدام كتل من مادة متدرّجة وظيفياً، لتكون حشوات ومساعدات على الوصل، مفيدة في تخفيض الإجهادات الحرارية المتبقّية (انظر الشكل 8 ـ 9).

تُستخدم في التقنية السابقة أجسام غضة مرصوصة تُسخَّن حتى درجات حرارة بين 627 و1300 مْ (بناءً على التركيب) تحت ضغط صفري. وتُستخدم تلك المواد بعدئذٍ لوصل المعادن مع السيراميكات بتراكيب مختلفة.




**الشكل 8 ـ 9: صورة ضوئية ميكرويّة لمقطع عرضاني (MgO/مادة متدرّجة وظيفياً Ni/Ni-NiO) تبيّن تدرّج التركيب في منطقة الوصلة بين النيكل والمحلول الصلب. تمثل المناطق التي في الصورة ما يلي: (أ) نيكل؛ (ب) مادة متدرّجة وظيفياً Ni-NiO؛ (ج) المحلول الصلب؛ (د) MgO.**

**الترذيذ التفاعلي**: كوَّن إينوي (Inoue) وماسوموتو[33][34] (Masumoto) خلائط غير متبلورة قائمة على الألمنيوم ذات تركيب متدرِّج في اتجاه العمق. وصُنعت الخلائط بطريقة الترذيذ التفاعلي مع التحكّم بتركيز النيتروجين بالجهد الكهربائي. تُظهر مقارنة هذه المواد الجديدة المتدرّجة وظيفياً غير المتبلورة (Reactive Sputtering) (Al-Ti - Al-Zr, Al-Cr) بتراكيب وحيدة الطَور مزايا التدرّج الوظيفي: فقد تضاعفت تقريباً مقاومة الحرارة حتى 200 ـ 300 مْ. وتضاعفت

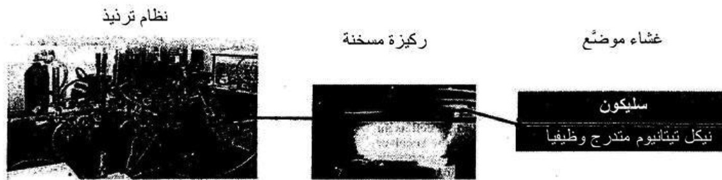
مقاومة الكشط مرات عدّة، وتضاعفت القساوة بمقدار 10 ـ 11 مرة، وتحسنت مقاومة الصدم كثيراً أيضاً.

وُضِّعت الخلائط اللامتبلورة المذكورة على ركيزة في جو من شوارد الأرغون الموجبة، التي أضيف إليها غاز النيتروجين. وجرى التحكُّم بتركيز النيتروجين لجعل تركيب الخليطة متدرّجاً. يُحقِّق التركيب المتدرّج للخلائط غير المتبلورة الجديدة محاسن الخلائط الوحيدة الطَور إفرادياً من دون مساوئها. إن الخليطة Al-Ti تبدأ بمعدن غير متبلور، وتنتهي بمادة سيراميكية متبلورة. والخليطة Al-Zr هي معدن يتغير تركيبه تدريجياً. وتبدأ الخليطة Al-Cr بمعدن غير متبلور، ويتدرج تركيبها لينتهي إلى مادة سيراميكية لامتبلورة.

واستخدم إينوي وزميله[35] الترذيذ التفاعلي بالتردّدات الراديوية للتيتانيوم في مزيج غازي من شوارد الأرغون الموجبة والنيتروجين، لصنع أغشية متدرّجة التركيب تتكوّن من الطَورين Ti وTiN. وُضِّعت الأغشية المتدرّجة وظيفياً Ti-TiN على شرائح مجهر زجاجية عند درجة حرارة الغرفة، وجرى تحديد بنية الأغشية الموضَّعة البلّورية، وتركيبها، وشكلها، باستخدام مقياس انعراج الأشعّة السينية، وجهاز أوجر (Auger) لقياس الطيف الإلكتروني، ومجهر المسح الإلكتروني. ووَجد العالِمان أن طريقة التحكّم بقدرة التردّدات الراديوية يمكن أن تُستخدم لتنمية أغشية متدرّجة التركيب. وبيَّنا أن الغشاء الموضَّع يتصف ببنية ذات طبقة TiN نانوية موجهة نحو محور معامد لطبقة التيتانيوم، وأن أشكال بُنى الأغشية مستقلة عن طريقة التوضيع. وبيَّنَا أيضاً أن قياس طيف الإشعاع الضوئي والتحليل الطيفي للكتلة كانا وسيلتين مفيدتين في مراقبة نمو تلك الأغشية.

وتحدث غريغ كارمان[36] (Greg Carman) عن فتح مهم في صنع مفعِّلات ميكرويّة من أغشية رقيقة متدرّجة وظيفياً. الجدير بالملاحظة هو أن الانفعال الشديد الذي يتولّد في أثناء عودة الـ NiTi

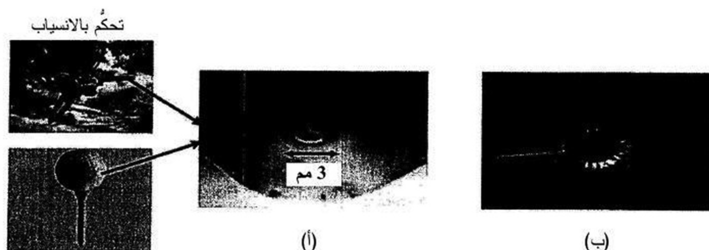
النابضية إلى شكلها الأصلي الذي تتذكره يُولِّد أكبر كثافة طاقة يمكن أن تعطيها مادة ذكية متوافرة، فهي أكبر بمرتبة كِبَر من تلك التي تولّدها المواد الكهروضغطية. إلا أن استجابتها البطيئة (1 هرتز)، والتفعيل الوحيد الاتجاه يحدَّان من فوائد خلائط تذكُّر الشكل تلك في كثير من التطبيقات الهندسية. ولتجاوز هذه المشكلة، طوَّر الباحثون لدى مختبر المواد النشطة (Active Material Laboratory) مفعِّلات ميكرويّة المقاس على شكل أغشية رقيقة، فارتفعت بذلك الاستجابة من 1 هرتز حتى 100 هرتز. إلا أنهم وجدوا أن صنع أغشية رقيقة لتحقيق تحسين بهذا المقدار ينطوي على مشكلة فقدان التيتانيوم في أثناء سيرورة التوضيع بالترذيذ حيث يجري نقل الجُسيْمات إلى الركيزة. ولمعالجة هذه المشكلة، ابتكروا طريقة جديدة تحدُّ من ضياع التيتانيوم باستخدام ركيزة مسخَّنة (انظر الشكل 8 ـ 11). لقد وجدوا أن حرارة الركيزة تؤثّر في انتشار التيتانيوم في أثناء الترذيذ، وأنه يمكن استخدامها للتحكّم بتركيب الغشاء في أثناء التوضيع. وأدّى هذا الكشف إلى تطوير أغشية رقيقة متدرّجة وظيفياً.




**الشكل 8 ـ 10: نظام ترذيذ وركيزة مسخنة وصورة توضيحية لمادة متدرجة وظيفياً تتذكر الشكل**[36].

فبتغيير درجة حرارة الركيزة في أثناء الترذيذ، صنعوا غشاءً رقيقاً ذا محتوى من التيتانيوم متدرّج عبر السماكة. ومع ازدياد محتوى

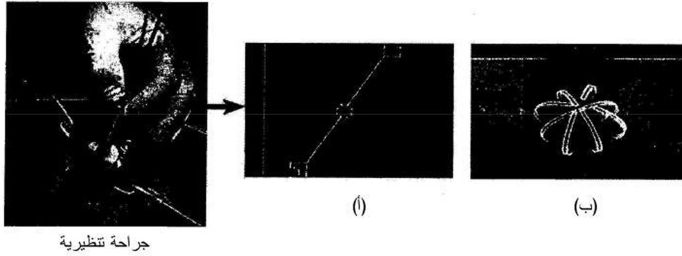
التيتانيوم عبر سماكة الغشاء الميكرويّة، تغيّرت خواص المادة من شبه مرنة (تشابه المطّاط) إلى مادة تتذكر الشكل. ويؤدّي التكامل المستمر، غير المنقطع، لخاصية شبه المرونة مع خاصية تذكُّر الشكل إلى مفعِّل مزدوج الاتجاه، وهذه أولى المواد التي تتصف بهذا السلوك. حين تسخين المفعِّل بتيار كهربائي ضعيف، يتشوّه مع تذكُّر شكله الأصلي. وعند التبريد، تعود المادة إلى ذلك الشكل. وبسبب أبعاد المفعِّل الصغيرة، يمكن لاستجابته أن تصل إلى 100 هرتز، محققة تحسّناً يزيد بأكثر من مرتبة كبر مقارنةً بمواد تذكُّر الشكل المتوافرة تجارياً. وبملاحظة أن قدرة الخرْج تساوي جداء الطاقة بالتردّد، نجد أن قدرة خرج هذه المفعِّلات الصغيرة جيدة.




**الشكل 8 ـ 11: تطبيقات التحكُّم بالانسياب: (أ) مفهوم المفعِّل الفقاعي، (ب) شكل هندسي أشد تعقيداً**[36].

وباستخدام تقنيات تصنيع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، صنع أولئك الباحثون مفعِّلات ميكرويّة. وأحد أوائل المفعِّلات التي طوَّروها كان مفعِّلاً فقاعياً للتحكُّم بالانسياب في نظم الطائرات (انظر الشكل 8 ـ 11). إن أحجام فقاعات المفعِّل من رتبة نتوءات كرة الغولف. وحينما يمر تيار كهربائي ضعيف في الفقاعة، تَبرُز إلى الخارج لتصبح ضمن الهواء المنساب. وحين قطع التيار، يبرد الغشاء

بسرعة ويعود النتوء إلى شكله الأصلي. إن التوضيع الصحيح للمفعِّل على الصاروخ أو الطائرة يمكن أن يقلِّل الكبح، وأن يحسّن المقدرة على المناورة الحركية الهوائية. واستقصى الباحثون أيضاً استخدام أشكال مفعّلات أشدّ تعقيداً لتوليد أنماط انسياب معقّدة لتحسين التحكم.




**الشكل 8 ـ 12: من تطبيقات الأدوات الطبية كماشة ميكروية (أ) مفتوحة بسبب مرور التيار الكهربائي (ب) ومغلقة حول جسيم مقاسه 50 ميكرون[36].**

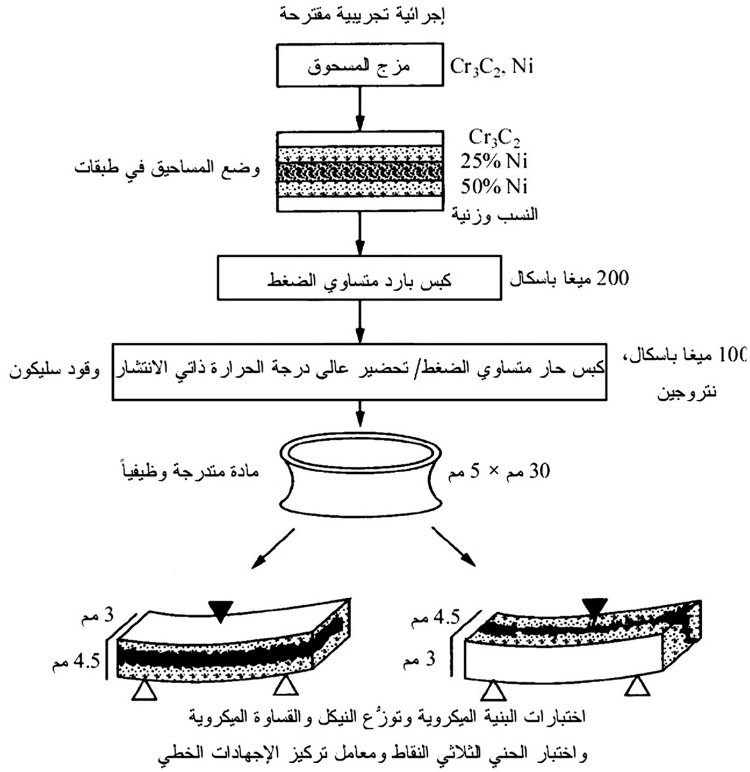
إضافة إلى مفعِّلات التحكُّم بالانسياب، صنع باحثو مختبر المواد النشطة كماشة ميكرويّة متعدّدة الأذرع باستخدام مادة تتذكر الشكل مصنوعة من غشاء رقيق متدرّج وظيفياً. المقاس الكلي للكماشة يساوي 100 ميكرون، أي إنه يساوي قطر شعرة إنسان، ويمكن للأطباء استخدام هذه الكماشة الميكرويّة للتعامل مع المتعضيات الميكرويّة، أو في الجراحة التنظيرية لاستئصال نسُج شاذة من قبيل الأورام (انظر الشكل 8 ـ 12). يمر عبر الكماشة الميكرويّة تيار ضعيف يجعلها تنفتح لتأخذ شكلاً مسطّحاً. وحين قطع التيار، تنغلق الأذرع الصغيرة لتكوِّن قفصاً قطره يساوي 50 ميكروناً تقريباً. من التطبيقات الطبية الحيوية الحالية لخلائط تذكُّر الشكل المكوَّنة من الـ NiTi مرشّحات الوريد الأجوف والشبكات الجراحية الطبية. مع

ظهور هذه التجهيزات الكهروميكانيكية الميكرويّة المتطوّرة التي تتذكَّر الشكل، سوف يتوسع طيف التجهيزات الطبية الحيوية كثيراً.

**التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار، والكبس الحار المتساوي الضغط** (Self-Propagating High-Temperature Synthesis/ Hot Isostatic Pressing (SHS/HIP)): حضَّر مياموتو وزملاؤه[34] لدى جامعة أوساكا بنية متناظرة لمادة متدرّجة وظيفياً مكوّنة من $Cr_3C_2/Ni/Cr_3C_2$، وذلك بطريقة التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار والكبس الحار المتساوي الضغط لمسحوقي الـ $Cr_3C_2$ والـ Ni باستخدام وقود السليكون (انظر الشكل 8 ـ 13).

يحترق وقود السليكون مع النيتروجين عند ضغط أكبر من 3 ميغا باسكال معطياً $Si_3N_4$. يجعل وقود السليكون هذه السيرورة اقتصادية وأكثر أماناً. وباستخدام كريات الثرمَيْت (Thermite) (مزيج من الألمنيوم وأُكسيد الحديد ذو تفاعل ناشر للحرارة) التي توضع في نقاط مختارة من فرن كيميائي، وجعلها تتفاعل عند درجة حرارة تقل عن 1000 مْ، يمكن الاستغناء عن نظام الإشعال الكهربائي.

يعطي استخدام وقود السليكون في هذه السيرورة مواد كثيفة فوراً بسبب التسخين الشديد الناجم عن نتردة السليكون في جو من النيتروجين المضغوط. وتتصف هذه السيرورة الجديدة السريعة العالية الحرارة باقتصاد الطاقة وبانطوائها على إمكانات لإيجاد مواد جديدة. وقد أبدت المادة المتدرّجة وظيفياً $Cr_3C_2/Ni/Cr_3C_2$ ذات التركيب المتدرّج المتناظر تقوية سطحية نجمت عن الإجهاد الضغطي المتبقّي عند السطح. وكانت النتيجة أن مقاومة المادة للحَنِي بلغت 85 كغ/ مم$^2$، أي أعلى بـ 50 ـ 60 في المئة من تلك التي للمواد المتدرّجة وظيفياً الحالية.

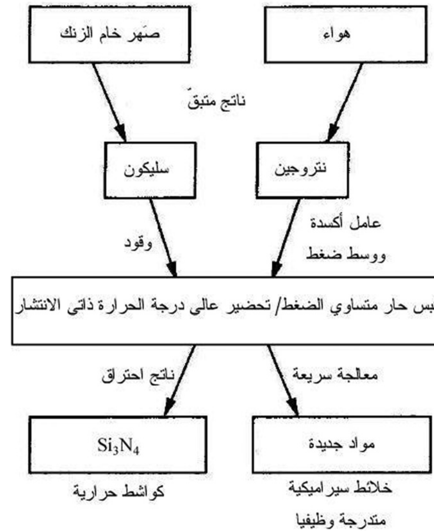



**الشكل 8 ـ 13: مخطط انسيابي لإجرائية لصنع المادة المتدرّجة وظيفياً المتناظرة** $Cr_3C_2/Ni/Cr_3C_2$.

ووُجد أيضاً أن متانة هذه المادة إزاء الكسر قد تحسّنت (10 ميغا باسكال م) عند السطح الغني بالـ $Cr_3C_2$ مقارنةً بالـ $Cr_3C_2$ الجَسِيم (3 ـ 5 ميغا باسكال م). ويُعتقد أن ذلك يعود إلى الإجهاد الضغطي المتبقّي القوي (580 ميغا باسكال) المتحرّض عند السطح من تقلّص الطبقة الوسطى الغنية بالـ Ni (التي تتصف بمعدّل تمدّد حراري أعلى من ذاك الذي للسطح) في أثناء التسخين والتبريد

السريعين في السيرورة. وتُسهم أيضاً جُسيْمات معدن النيكل المنتشرة قليلاً في تحسين المتانة. ويقول الباحثون الذين طوَّروا الطريقة إن آلية التمتين هذه، التي يسمونها التمتين التدرّجي، قابلة للتطبيق على المعادن والسيراميكات الأخرى.

تُعتبر هذه السيرورة مفيدة لتصنيع المواد المتدرّجة وظيفياً لأنه يمكن تصليد التراكيب المتدرّجة ذات درجات حرارة التلبيد المختلفة الذي ينجم عن التكثيف السريع. على سبيل المثال، جرى تكثيف مواد متدرّجة وظيفياً، من قبيل كربيد التيتانيوم ـ نيكل (TiC/Ni) وثاني بوريد التيتانيوم ـ نيكل ($TiB_2/Ni$) وكربيد الكروم ـ نيكل ($Cr_3C_2/Ni$) وثاني سيليسيد الموليبدن ـ كربيد السليكون/ ألمنيد التيتانيوم ($MoSi_2$-SiC/TiAl)، كلياً.




**الشكل 8 ـ 14: مخطط انسيابي لسيرورة التلبيد بالاحتراق وضغط الغاز (كبس حار متساوي الضغط/ تحضير عالي درجة الحرارة ذاتي الانتشار) باستخدام السليكون وقوداً.**

أما وقود السليكون الذي استُخدم فهو ناتج ثانوي للصهر الكيميائي (Smelting) للزنك. في أثناء مرحلة التلبيد من السيرورة، يُنترد السليكون بغاز النيتروجين الذي يمثّل أيضاً مصدر ضغط لسيرورة الكبس الحار المتساوي الضغط. ويمكن استخدام ناتج الاحتراق، وهو جسم صلب هش يتألف من الطَور بيتا للـ $Si_3N_4$، ومن مقدار ضئيل من السليكون، لصنع المواد الحرارية والكاشطة وغيرها من التطبيقات. يُظهر الشكل 8 ـ 14 مخططاً انسيابياً للسيرورة برمتها.

واستخدم باحثو جامعة أوساكا[34] فرناً كيميائياً بالإضافة إلى الكبس الحار المتساوي الضغط، جامعين بذلك كلاً من التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار والكبس الحار المتساوي الضغط. تألف الفرن الكيميائي من بوتقة غرافيتية تحتوي على وقود السليكون، ووعاء زجاجي يوضع فيه الجسم المرصوص الغض ويُحكَم سده بطريقة تغليف زجاجي آلية. وابتُدئ الإشعال إما كهربائياً عند درجة حرارة منخفضة بتمرير تيار شدته 60 أمبيراً مدة ثلاث ثوان عبر مسخِّن إشعال، أو كيميائياً باستخدام عامل ثرمَيْتي. على سبيل المثال، يولِّد مزيج أُكسيد الحديد ($Fe_2O_3$) والألمنيوم تفاعلاً قوياً ناشراً للحرارة في جو من النيتروجين المضغوط حتى 100 ميغا باسكال عند درجة حرارة تساوي 927 مْ.

يشعر مطوِّرو الطريقة الكيميائية[34] أنها تمتاز على الإشعال الكهربائي لأنه يمكن الحصول على طاقة تسخين متجانسة لعيّنات كبيرة بتوزيع كريات الثَرميْت توزيعاً متجانساً، ولأنه يمكن تشغيل وإشعال أفران كيميائية عدّة في الكبس الحار المتساوي الضغط في الوقت نفسه. وبتغيير مقدار الوقود المستخدم أيضاً في كل فرن، يمكن تكييف ظروف التسخين للمواد المختلفة. ومقارنةً بمصادر طاقة

التسخين القوية الأخرى، كالليزر والبلازما، التي تستطيع تسخين حيّز أو حجم صغير، يمكن للفرن الكيميائي أن يعطي كمية كبيرة من الحرارة فوراً لكمية كبيرة من المواد.

وفي عمل آخر في جامعة أوساكا، استُخدم التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار مع الكبس الحار المتساوي الضغط لتحضير الـ TiC-Ni. وُضعت المساحيق المتفاعلة المكبوسة داخل وعاء زجاجي مخلًّى من الهواء مُحكم الإغلاق، ووُضع الوعاء في بوتقة مملوءة بعامل احتراق. وابتُدئ التفاعل بالسخونة المتحررة من عامل الاحتراق في جو من شوارد الأرغون الموجب تحت ضغط يقل عن 100 ميغا باسكال. لقد كانت مقاومة المادة الناتجة للحَنِي بين 1100 و1340 ميغا باسكال عند درجة حرارة الغرفة، وبين 630 و920 ميغا باسكال عند 500 مْ، تبعاً لتركيب المادة.

واستخدم ما (Ma) وزملاؤه[37] السيرورة نفسها، التي أسموها التلبيد بالاحتراق تحت ضغط الغاز (Gas-Pressure Combustion Sintering) (GPCS)، لتركيب وتكثيف سيراميكات أو مواد مركَّبة حرارية آنياً وبسرعة. وكانت هذه السيرورة ملائمة لصنع مواد متدرّجة وظيفياً لأن انتشار العناصر كان محدوداً بسبب سرعة السيرورة التي أدّت إلى الحفاظ على الترتيب المتدرّج للمادة المركَّبة.

وتضمنت دراستهم الجمع بين الـ TiC والـ Ni أيضاً. فقد كان من السهل صنع TiC كثيف ومواد مركَّبة قائمة على النيكل بالتلبيد بالاحتراق لأن الـ TiC يتصف بطاقة تشكيل عالية (Formation Energy) (180 كيلو جول/ مول).

ووجدوا أن المادة المتدرّجة وظيفياً TiC/Ni، مع تراكيب متدرّجة مختلفة، تتصف ببنية ميكرويّة فريدة، حيث تصبح حُبيْبات الـ TiC أنعم، فأنعم، عند الانتقال من طرف السيراميك TiC إلى طرف المعدن Ni. وقيست الخواص الميكانيكية والحرارية لمواد الـ /TiC

Ni النانوية التصنيف، واستُخدمت لتصميم مادة متدرّجة وظيفياً. وبالتحميل الدوري، كان فرق درجة الحرارة تقريباً 327 مْ بين أعلى وأسفل المادة المتدرّجة وظيفياً، وعندها ظهرت تصدّعات أولية ضعيفة، إلا أن التركيب المتدرّج من أجل قيم n بين 0.5 و0.7 أبدى تحمّلاً حرارياً جيداً نسبياً.

وركَّب باحث آخر[34] المنظومة $Al_2O_3/TiC/Ni/TiC/Al_2O_3$، وهي بنية متناظرة متدرّجة وظيفياً يُتوقع أن تتصف بالإصلاح الذاتي أو التخميل الكيميائي حين تأكسد الـ TiC عند درجات الحرارة العالية.

ولبَّد دونغليانغ (Dongliang) وزملاؤه[1] غطاء من مسحوق ناعم من الطَور ألفا لكربيد السليكون مع زجاج خاص، وذلك بالكبس الحار المتساوي الضغط عند ضغط يساوي 200 ميغا باسكال، ودرجة حرارة تساوي 1800 مْ. وكانت كثافة المادة الناتجة قريبة من 97.5 في المئة من الكثافة النظرية. ووصلت مقاومة الحَنِي حتى 582 ميغا باسكال، وهذه قيمة تزيد بـ 50 في المئة على تلك التي لكربيد السليكون الشائع الملبَّد من دون ضغط. وبعد المعالجة اللاحقة بالكبس الحار المتساوي الضغط، ازدادت الكثافة مرة أخرى لتصبح أكبر من 98.5 في المئة من الكثافة النظرية. وكان العمل التجريبي ناجحاً في صنع المادة المتدرّجة التركيب $SiC\text{-}Si_3N_4$، التي اتصفت بمقاومة شدّ تساوي $100 \pm 900$ ميغا باسكال، وبمتانة إزاء الكسر تساوي 8.4 ميغا باسكال م، وهاتان قيمتان تساويان مثلي نظيرتيهما اللتين لكربيد السليكون المضغوط حرارياً.

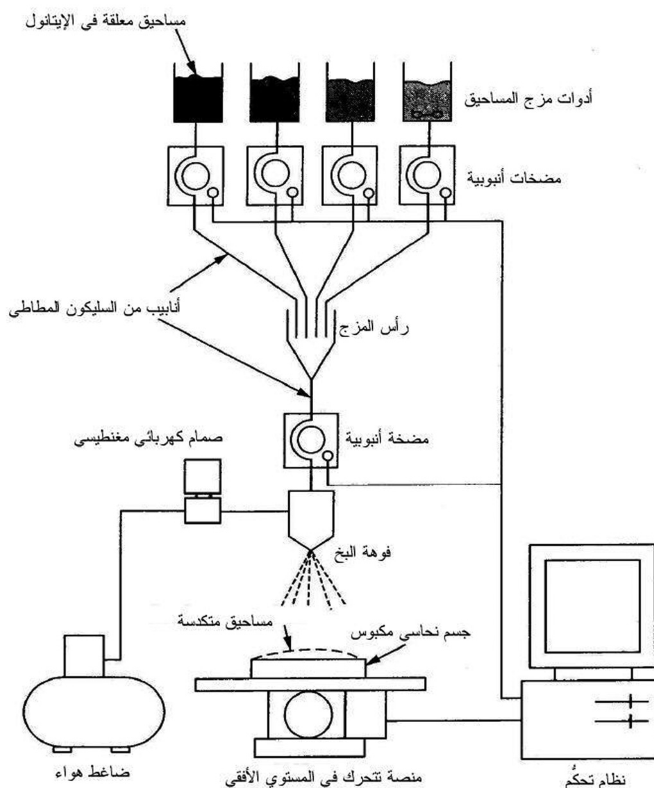
واستقصى فينج (Feng) ومور[39] (Moore) المادة المتدرّجة وظيفياً $TiB_2/Al_2O_3/Al$ باستخدام التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار بوصفه طريقة معالجة كفوءة لتحضير المنظومات المعدنية السيراميكية. ووفَّر الانفجار الحراري لكرَّية المادة المتدرّجة

وظيفياً الغضّة مع الرصّ الخفيف، اللذين طُبِّقا آنياً في أثناء حصول التفاعل، وسيلة لتصليد المادة المتدرّجة وظيفياً. ووفّر الرصّ عند ضغط لا يزيد على 1.4 ميغا باسكال تحسّناً هائلاً في كثافة المادة. لقد كانت ثمة حاجة إلى هذا الجمع بين التحضير بالاحتراق والرصّ بغية إنتاج مواد متدرّجة وظيفياً حتى عند استخدام مفهوم تسريب المعدن السائل الزائد.

وباستخدام تقنيتين مطوَّرتين خصيصاً، هما جهاز مؤتمت لبخ ومراكمة المسحوق مبيّن في الشكل 8 ـ 15، والكبس الهيدروليكي الساكن للعينة المشتعلة كي تتشكَّل آنياً وتكوِّن المادة المتدرّجة وظيفياً، جرى توضيع مادة متدرّجة وظيفياً مكوّنة من $TiB_2$-Cu (قطرها 30 ملم وسماكتها 1 مم) بالتحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار على ركيزة نحاس، وفقاً لما أورده ساتا[40] (Sata).

تضمنت خطوات السيرورة أولاً توليد التركيب المتدرّج بالتحكّم الحاسوبي بكل من معدّل نقل معلقات المسحوق إلى سطح الركيزة وأنماط حركة المنصة في المستوي الأفقي فوق منطقة المُراكمة. وجرى تطوير برنامج بخ وفق المبيّن في الشكل 8 ـ 16. ثم عُرِّضت العيّنات المتراكمة للكبس البارد المتساوي الضغط، وجرى تخليصها من الغازات قبل التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار الآني والتصليد. وباستخدام مسار التركيب الملائم الذي يكون فيه النحاس فقط سائلاً (أي لم يتحول إلى غاز)، كانت المادة المتدرّجة وظيفياً الناتجة المكوّنة من $TiB_2$-Cu خالية من التصدّع ومن المسامات الكبيرة. وفي أنماط الكثافة المصورة بالأشعّة السينية لكل عنصر في العيّنة، شوهد أن التركيز تغيّر تدريجياً من ركيزة النحاس حتى السطح. يعتقد مطوّرو الطريقة أنه يمكن صنع صفائح وأشكال كبيرة

ومعقّدة بهذه الطريقة، وذلك بسبب استخدام الكبس البارد المتساوي الضغط .




**الشكل 8 ـ 15: مخطط توضيحي لنظام مؤتمت لبخ ومراكمة المساحيق يُستخدم في صنع مواد متدرجة وظيفيا بالتحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار.**

**التلبيد ببلازما الشرر** (Spark Plasma Sintering) (SPS): نجحت الشركة .Sumitomo Mining Co. Ltd[1] في تركيب مادة متدرّجة وظيفياً من الزجاج والمعدن باستخدام التلبيد ببلازما الشرر. يختلف الزجاج عن المعادن اختلافاً كلياً، لذا فإن صنع مواد متدرّجة وظيفياً

من هذه المواد بالطريقة الشائعة صعب للغاية. وقد أحدثت الشركة سيرورة التلبيد ببلازما الشرر لتلبيد مساحيق تلك المواد بتطبيق ضغط عالٍ وتيار كهربائي في الوقت نفسه. ويمكن استخدام المادة الناتجة لصنع مُجِسَّات تعمل عند درجات الحرارة والضغوط العالية وفي مجال الإلكترونيات البصرية.

إن سيرورة التلبيد ببلازما الشرر هي سيرورة تحضير فريدة من حيث إنها تُدخِل طاقة بين فجوات جُسيْمات الكتلة الغضّة المرصوصة. تُطبَّق طاقة بلازما الانفراغ العالية المتولِّدة آنياً لتحقيق التلبيد، أو الربط التلبيدي عند درجة حرارة منخفضة وخلال مدة أقصر مقارنةً بالسيرورات الشائعة. ويمكن النظر إلى هذه السيرورة على أنها سيرورة تلبيد جديدة من الجيل القادم تَستخدم بكفاءة قصوى مفعول التسخين الذاتي التلقائي الذي ينشأ ضمن عيّنة الجُسيْمات، على غرار التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار. لكن في الطريقة الكهربائية، سُخِّنت المساحيق بسرعة كبيرة جعلتها تتلبّد ككلّ متكامل قبل أن تُتاح الفرصة للتمدّد الحراري ليخرب الناتج.

صُنعت المادة المتدرّجة وظيفياً باستخدام الزجاج والسليكون، أو الزجاج والفولاذ غير القابل للصدأ معاً، وقد جرى تكوينها على شكل قرص قطره 2 سم، وسماكته 1 سم. طُبِّق أولاً ضغط يساوي 30 ضغطاً جوياً لمزج وتصليد الزجاج والمعدن المسحوقين من دون أن يكون هناك أي فراغ. ومُرِّر تيار كهربائي شدّته 50 أمبيراً على نحو متقطع بفواصل زمنية ثابتة، ثم سُخِّن المزيج المسحوق حتى 800 مْ، وحصل التركيب بسرعة خلال مدة لم تتجاوز 15 دقيقة. وعند فحْص توزُّع تركيب المادة، تبيَّن أنه يتغير تدريجياً من السطح حتى المركز، وهذا ما يشير إلى أن المادة قد تكوَّنت على هيئة متدرّجة وظيفياً.

إضافة إلى ذلك استخدم باحثون[42] لدى أكاديمية الدفاع الوطنية في اليابان الطريقة الكهربائية الجديدة لتركيب مواد متدرّجة وظيفياً من خليطة الـ Ti-Al وخليطة Zr، وهما مادتان درجتا انصهارهما متباعدتان كثيراً.

برغم أن درجة حرارة انصهار خليطة التيتانيوم ألمنيوم تساوي 1200 مْ، وأن درجة حرارة انصهار خليطة الزركونيوم تساوي 1600 مْ، إلا أنّ الباحثين تمكنوا من جَسْر الفارق المساوي لـ 400 مْ بوضع مزيج المساحيق الأولي ضمن قالب غرافيت محدَّب. وعندما مُرِّر تيار كهربائي شديد في القالب المحدّب، كان التيار أكثف عند رأس القالب، حيث ولَّد حرارة أعلى في تلك المنطقة. يمكن لتيار شدته 1200 أمبير أن يُولِّد فرق درجة حرارة يساوي 900 مْ بين المسحوقين اللذين في أسفل وأعلى القالب. تمكِّن الطريقة الكهربائية من تلبيد المادة خلال نحو 6 دقائق، في حين أن التقنية المعتادة قد تستغرق أكثر من 6 ساعات.

**التوضيع بالتهجير الكهربائي** (Electrophoretic Deposition (EPD)): استخدم ساركر (Sarkar) وزملاؤه[1] التوضيع بالتحليل الكهربائي مع خط تلبيد لتحضير مواد مركَّبة من الزركونيا المثبّتة بالإيتريوم والياقوت الأزرق ($Al_2O_3$) متدرِّجة التركيب. وقد أُنقصت نسبة الزركونيا تدريجياً من سطح غني بها إلى السطح الآخر الغني بالياقوت الأزرق. ووُجد أن قساوة فيكرز البنيوية الميكرويّة قد تغيرت مع التدرُّج التركيبي (16 ـ 24 جيغا باسكال)، كما تغيّرت المتانة تجاه الكسر بالخدش أيضاً (3 ـ 10 ميغا باسكال م).

**المراكمة بالترقيد** (Sedimentation): استخدم ميلَّر (Miller) ولانُوتِّي[44] (Lannutti) سيرورة مراكمة معدّلة لإنتاج المادة المتدرِّجة وظيفياً $NiAl/Al_2O_3$ التي أُخضعت إلى اختبارت حني رباعية النقاط بغية تحديد سلوك الانزياح الميكانيكي عند التحميل في طبقة داخلية منها.

كانت قيم اختبارات الحَنِي عند درجة حرارة الغرفة أكبر بـ 3 ـ 4 مرات من تلك التي لكل من الـ NiAl غير المقوَّى والـ NiAl المقوَّى بألياف الياقوت الأزرق (570 ميغا باسكال مقارنةً بـ 150 ميغا باسكال)[1]. وعند الدرجة 572 مْ، كانت قيم اختبارات الحَنِي الأخيرة أكبر بنحو 50 في المئة (150 ميغا باسكال مقارنةً بـ 100 ميغا باسكال)[45]، وعند الدرجة 727 مْ كانت أكبر بمرتين (100 ميغا باسكال مقارنةً بـ 50 ميغا باسكال)[45]. وعند درجات الحرارة المرتفعة، حصل تصدُّع للمادة المركَّبة على شكل متدرّج غير كارثي تضمن إعاقة الـ NiAl لانتشار التصدّعات المتولِّدة عند سطح الـ $Al_2O_3$.

**توضيع المسحوق المتعدّد المكوّنات** (Multi-Ingredient Powder Deposit): طوَّر معهد مياغي للتقانة (Miyagi Institute of Technology) وشركة .Makabe Co[46] معاً سيرورة لصنع مواد متدرِّجة وظيفياً جسيمة. وجرى بواسطة التحكّم الحاسوبي تحويل مساحيق المواد إلى مزيج ملاطي تم بخُّه من فوهة نفث بسرعة فوق صوتية للوصول إلى توضيع مستمر متجانس. وقد جرى التوضيع والتلبيد في آن واحد لتكوين أقراص بلغت أقطارها 90 مم. وقد أعطت هذه السيرورة عيّنات كبيرة الحجم من مادة متدرّجة وظيفياً رخيصة وقابلة للإنتاج المتكرر بالمواصفات نفسها، إضافة إلى خلوِّها من العيوب التي هي من قبيل النزوع إلى الاعوجاج أو التفكُّك.

تهتم هذه السيرورة الجديدة بمادتين هما: الزركونيا والفولاذ العديم الصدأ. أما الفوهة النفاثة بسرعة فوق صوتية، وحركة منصة التوضيع، فتجعلان الموضّع السميك متجانس السماكة. ولا يسمح تصميم السيرورة لأي جزء من المادة المبخوخة بالارتداد عن الركيزة، وهذا يدرأ هدر مادة التوضيع. إن هذه السيرورة قابلة

للاستخدام في الإنتاج السريع والسهل للأجسام الأسطوانية الكبيرة والأشكال المعقّدة، ومنها الولائج الرقيقة والموضِّعات المسطّحة.

**تعدين المسحوق** (Powder Metallurgy): استقصى بيشوب (Bishop) وزملاؤه[47] نظام إنتاج كمي لصنع المواد المتدرِّجة وظيفياً. وقد اختاروا للدراسة منظومة معدن وسيراميك لها تطبيقات في تجبير الكسور والتعويضات السنية. وكان العنصر المعدني هو التيتانيوم المستخدم حالياً في الجراحة على نطاق واسع، أما المادة السيراميكية فقد كانت من الهيدروكسي أباتيت (Hydroxyapatite). إن هذه المادة السيراميكية نشِطة حيوياً، أي إنها تتفاعل كيميائياً مع العظم الحي لتكوين رابط قوي يستطيع مقاومة الإجهادات الشديدة. والعضو المزروع المصنوع من مادة نشِطة حيوياً يُصبح بسرعة ثابتاً وقوياً من دون الحاجة إلى أي وسائل تثبيت ميكانيكية كالبراغي ولواصق العظام. ويُؤْمَل أن يُحسِّن تضمين هذه المادة في التيتانيوم ترابط العظم، وأن يتحقَّق ذلك من دون تدنٍّ ملحوظ في الخواص الميكانيكية، وذلك بفضل تدرُّج تركيب المادة.

بيَّن هذا العمل أن المادة المتدرِّجة وظيفياً يمكن أن تُنتَج بسيرورة منخفضة درجة الحرارة، مقارنةً بالتلبيد، إضافة إلى كونها سريعة. ودرجة الحرارة المنخفضة تنطوي على مزايا اقتصادية، إضافة إلى تقليص المشاكل التي يمكن أن تنجم عن اختلاف خواص المادة، ومنها درجة حرارة الانصهار ومُعَامل التمدّد الحراري.

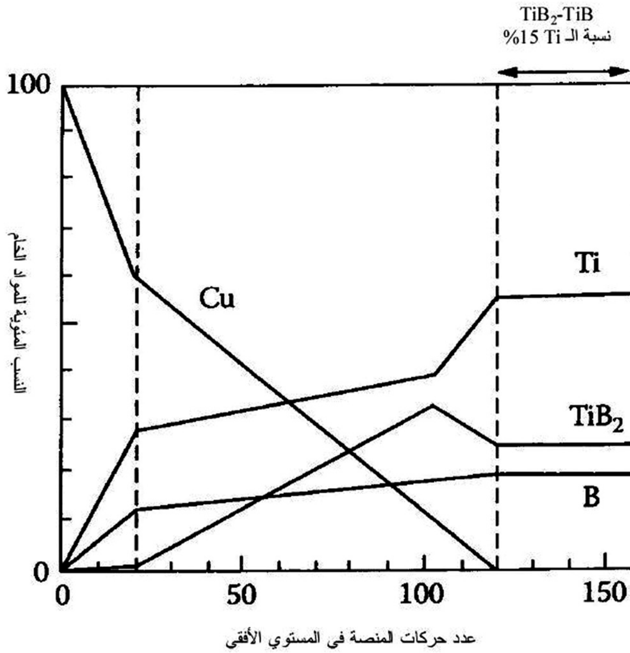
استُخدمت في هذه السيرورة مزائج جافة من مسحوقَي التيتانيوم والهيدروكسي أباتيت تحتوي على 10، 20، 30 في المئة من الهيدروكسي أباتيت HA (نسب وزنية) لتكوين التراتيب الطبقية الآتية: Ti, Ti-10% HA, Ti-20% HA, Ti- 30% HA. ثم رُصَّت طبقات المساحيق على البارد بضغط يساوي 500 ميغا باسكال مدة

دقيقة واحدة لتكوين قطعة غضة، ارتفاعها يساوي 60 ملم تقريباً. ووُضعت القطع الغضّة في فرن لتسخينها حتى درجة حرارة التصليد، حيث أُبقيت مدة 30 ـ 60 دقيقة عند درجة حرارة تساوي 500 مْ. ونُقلت القطع إلى قالب قطره 60 ملم وضُغطت وهي ساخنة بضغط عالٍ جداً يساوي 1630 ميغا باسكال.

في ما يخص المنظومة المدروسة، كانت النتائج مشجعة جداً. فإضافة إلى إمكان استخدام هذه الطريقة لصنع مواد متدرِّجة وظيفياً، يمكن استخدامها أيضاً لصنع مواد مركَّبة متجانسة من التيتانيوم والهيدروكسي أباتيت. ولذا يمكن عملياً صنع نواة متدرّجة وظيفية قوية ومتينة مع طبقة خارجية غنية بالهيدروكسي أباتيت.

**التشكيل ببخ المسحوق** (FGMs via Powder Spray Forming): استُخدم تعدين المسحوق في جامعة توهوكو[48] (Tohoku) لصنع مادة متدرِّجة وظيفياً من مسحوق الزركونيا المثبَّتة جزئياً PSZ (بمقاس جُسيْم وسطي يساوي 0.07 ميكرون)، ومسحوق فولاذ عديم الصدأ طراز 304 (بمقاس جُسيْم وسطي يساوي 3 ميكرون). يبيِّن الشكل 8 ـ 17 سيرورة بخ المسحوق المؤتمتة التي استُخدمت لترسيب المسحوقين المعلَّقين في الإيثانول على ركيزة غضة مسخّنة سلفاً مصنوعة من مسحوق الفولاذ العديم الصدأ (قطرها يساوي 14 ملم وسماكتها تساوي 2 مم). وغُيِّرت نسبة الزركونيا والفولاذ المرسَّبين تدريجياً وفقاً لمنحني تصميم معدٍّ سلفاً يُتحكَّم به حاسوبياً بدقة 0.01 مم. ولاستكمال السيرورة، تُكبس الركيزة المطلية بالمادة المتدرِّجة وظيفياً كبساً متساوي الضغط وتُغلَّف، ثم تُكبس كبساً حاراً متساوي الضغط. وعند فحْص البنية الميكرويّة للمادة المتدرِّجة وظيفياً، وُجد عند التراكيز المنخفضة للزركونيا المثبَّتة جزئياً أن طَور الزركونيا قد تغلغل ضمن الفولاذ العديم الصدأ. ومع زيادة نسبة الزركونيا، تتكوَّن

بنية زركونيا شبكية تتغلغل فيها جُسيْمات الفولاذ العديم الصدأ. وكانت مقاومة هذه المادة للصدمة الحرارية أكبر بمرتين ونصف من مقاومة الزركونيا المثبّتة جزئياً الجَسيمة. لقد استُخدمت هذه الطريقة أيضاً لصنع طلاءات مقاومة للصدمة الحرارية مكوّنة من الزركونيا المثبّتة جزئياً والموليبدن أو التنغستين.




**الشكل 8 ـ 16: برنامج بخ مساحيق للمادة المتدرجة وظيفياً** $TiB_2$-Cu.

ظهرت طرائق تعدين مسحوق أخرى لتحضير المواد المتدرِّجة وظيفياً: Ni-MgO، Ni-NiO، $Ni$-$Si_3N_4$، Al-AlN، حيث ضُغط مزيج المعدن والسيراميك المتدرِّج التركيب وهو بارد بضغط يساوي 20 ـ 32 ميغا باسكال.

**بخ البلازما** (Plasma Spray): اختار إرغلو (Erglu) وزملاؤه[49] منظومة مكوّنة من $NiCr-Al/MgO-ZrO_2$ لدراستها بوصفها طلاءً حرارياً عازلاً يُستخدم في صناعة السيارات والصناعة الجوية الفضائية. يتألف هذا الطلاء عادة من طبقتين هما NiCr-Al و$ZrO_2$ مثبتة بالـ MgO، وتعمل الطبقة الأولى كطلاء لاصق لطلاء علوي سيراميكي $MgO-ZrO_2$ يتصف بالخواص السطحية المطلوبة، ومنها الناقلية الحرارية المنخفضة. إن منطقة التقاء الطلاء اللاصق مع الطلاء السيراميكي هي المنطقة التي يحصل فيها تلف الطلاء في أغلب الأحيان حين تعريضه إلى تدرُّجات حرارية كبيرة. إلا أن المنطقة المتدرِّجة وظيفياً، من طبقة معدنية إلى طبقة سيراميكية، تؤدّي إلى تغيّرات متدرِّجة في الخواص، ومنها القساوة ومُعَامل التمدّد الحراري، ولذا، إلى تحسُّن مقاومة الطلاء للتلف[50].

طوَّر إرغلو وزملاؤه طريقة لتركيب طلاءات متدرِّجة في مفاعل بخ بلازمي وحيد المشعل، حيث جرى تحضير طلاء من طبقات منفصلة من الزركونيا التي تزايدت نسبتها مع ازدياد سماكة الطلاء.

وطوَّر شيمادا[51] (Shimada) لدى الشركة (Nippon Steel) نوعاً جديداً من البخاخ البلازمي يحتوي على أربعة مداخل للمسحوق، وذلك للتوضيع بالبخ البلازمي المنخفض الضغط لطلاءات متدرِّجة وظيفياً. يمكن بهذا البخاخ حقن مسحوقَي المعدن والسيراميك في الوقت نفسه. بهذه الطريقة، جرى تحضير طلاء سماكته 1 ملم ذي تركيب متدرّج من 8 في المئة زركونيا مثبتة بـ $Y_2O_3$، وNi-20% Cr على فولاذ غير قابل للصدأ أو نحاس (بعرض 30 ملم وسماكة 5 مم). وقد تحمَّل هذا الطلاء فارقاً حرارياً يساوي 377 مْ بين السطحين العلوي والسفلي دام 80 دورة حرارية من دون تلف. يُعدُّ التصفيح

بصفائح رقيقة، باستخدام تقنية البخ البلازمي المنخفض الضغط هذه، واعداً للإنتاج الكمي للإنشاءات الكبيرة المعقّدة.

وأنتج الباحثون[52] لدى شركة Plasma Processes Inc. مادة متدرِّجة وظيفياً بالمعالجة المتقدمة بالبخ البلازمي في الخلاء لتطبيقات التدفّق الحراري القوي. وطوَّروا طرائق تصنيع لمادة متدرِّجة وظيفياً من أربعة مكوّنات هي النحاس والتنغستين والبورون ونيتريد البورون. وصُنعت المادة بتدرُّج مستمر باستخدام قنوات تبريد متكاملة تزيل خطوط اللاصق وتوفّر نقلاً مباشراً للسخونة من السطح المعرَّض لدرجة حرارة عالية إلى وسط التبريد. وأُجريت أيضاً تحليلات تعدينية باستخدام انعراج الأشعّة السينية للمواد المتكونة بواسطة سيرورة البخ البلازمي في الخلاء المبتكرة. تمتد تطبيقات هذه المادة الإنشائية المتدرّجة وظيفياً من مكوّنات مواجهة البلازما في مفاعل الاندماج حتى مخاريط أنوف الصواريخ، مروراً بمراجل الغلي.

**التشكيل الفائق اللّدانة/ الربط التغلغلي** /Superplastic Forming) DiffusionBonding (SPF/DB)): صنع ناغانو (Nagano) وواكاي[53] (Wakai) بنجاح مادة متدرِّجة وظيفياً ($ZrO_2$-$Al_2O_3$) بطريقة التشكيل الفائق اللّدانة والربط التغلغلي عند درجة حرارة ربط تساوي 1550 مْ، وانفعالات تساوي 17 و33 و50 في المئة.

كانت مقاومة الحَنِي الظاهرية لهذه المادة مختلفة تبعاً لاتجاه تطبيق الإجهاد. فعندما كان جانب التوتر مكوَّناً من الـ Y-TZP (انظر الجدول 8 ـ 2) كانت مقاومة الحَنِي الظاهرية للعينة (عند انفعال قدره 50 في المئة) 1860 ميغا باسكال. وعندما كان جانب التوتر هو الـ $Al_2O_3$، كانت مقاومة الحَنِي الظاهرية (عند انفعال قدره 50 في المئة) 330 ميغا باسكال.

ورأى الباحثان أن سبب هذه الظاهرة هو ازدياد الإجهاد الضغطي المتبقّي في السطح Y-TZP مع ازدياد اعوجاج المادة المتدرِّجة الوظيفة، وازدياد مقاومة مادة القاعدة مع ازدياد الانفعال في التشويه الضغطي[54].

**توضيع الأبخرة كيميائياً** (Chemical Vapor Deposition):

عرض كوده[1] (Kude) إمكان توضيع مادة متدرّجة وظيفياً على شكل معقد بتوضيع بخار كربيد السليكون كيميائياً في ست خطوات على ألياف كربون، وعلى أنبوب غرافيتي أسطواني، وعلى طبق غرافيتي. وكانت المصادر الغازية للطلاءات هي الميثان ($CH_4$) للكربون، ورباعي كلور السليكون ($SiCl_4$) والميثان لكربيد السليكون. وغُيِّرت نسبة الكربون في المادة الموضَّعة بتغيير النسبة المولية للغازين، أي إن تغيير النسبة SiC/C في الطَور الغازي يغيّر النسبة C/(SiC+C) في المادة الموضَّعة.

من خلال التحكُّم بظروف التوضيع الكيميائي للبخار، يمكن تغيير البنية الميكرويّة للطلاءات المتدرّجة وظيفياً من بنية كثيفة إلى مسامية. لقد وُجد أن البُنى المسامية تقاوم كلاًّ من التفكّك الصفيحي وانتشار الصدوع، واستنتج الباحثون أنه من خلال التحكُّم بالبنية الميكرويّة لهذه المواد المتدرّجة الوظيفة، يمكن التحكُّم بعزلها وتعبها الحراريين.

حين استخدام مادة مركَّبة كربون/كربون في صنع المادة المتدرّجة وظيفياً، ولَّد التوضيع النافذ للبخار كيميائياً بنية داخلية متدرِّجة وظيفياً، وكانت المحصلة النهائية أن نسبة السليكون تغيرت تدريجياً ضمن مادة الـ ك/ك. وقد اختُبر التعب الحراري للمادة الناتجة المتدرّجة الوظيفة، مع طلاء SiC/C متدرّج وظيفياً صُنع بترسيب البخار الكيميائي، في بيئة حجرة الاحتراق في صاروخ، وكانت النتائج ممتازة[55].

## وصل المواد المتدرّجة وظيفياً

قام كوديسيا (Kudesia) وزملاؤه[(1)(56)] بصنع مواد مركَّبة موصولة معاً مكوَّنة من السيراميك TiC ومتعدّد المعدن NiAl بنجاح. وقد استخدموا التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار لتحضير كل من طبقة الوصلة المتدرّجة وظيفياً والمادتين اللتين سوف توصلان معاً. وقد جرى التحقُّق من نجاح التكثُّف والاحتفاظ بتدرُّج التركيب بعد التصنيع بقياس الخصائص بواسطة مجهر المسح الإلكتروني، ومطياف تبديد الطاقة (Energy-Dispersive Spectrometer) (EDS) على الترتيب. وأُجريت حسابات تصميمية للصدمة الحرارية للمواد المركَّبة TiC/NiAl الموصولة بطبقة من مادة متدرّجة وظيفياً، وبيَّنت الحسابات الدور المهم لموسّطات شكل العينة الهندسي في نشوء الإجهادات الحرارية العابرة. وأُجريت حسابات تصميمية لاحقة لشكل هندسي ثابت مع خواص مواد متغيرة لبيان أهمية التداخلات في ما بين خواص المادة. ويُتوقع أن تُعطي سيرورة التصميم والتصنيع العودية هذه، مع تجارب التعب والصدمة الحراريين المخططين، مواد موصولة تتصف بأداء متميز في ظروف الاستخدام المتوقعة.

ووصف فوجيوارا (Fujiwara) وزملاؤه[(57)] برنامج وصل فاعل جداً يهدف إلى إقامة تقانة تصنيع للوحات تبريد باستخدام المواد المتدرّجة وظيفياً القائمة على طريقة صفائح الأغشية الرقيقة.

**1** ـ لضمان وجود خلوص لَأْم في وصل صفيحة من مادة متدرّجة الوظيفة مع صفيحة معدنية، يجب إعطاء صفيحة المادة المتدرّجة وظيفياً شكلاً يولِّد سطحاً مستوياً عند تسخينه حتى درجة حرارة اللأْم.

**2** ـ عند لأْم صفيحة من مادة متدرّجة وظيفياً مع صفيحة معدنية باستخدام حشوة لأْم من النيكل، تنزع عيوب شبيهة بالمسامات إلى

الظهور في الطَور الأصهري المتكوِّن بين الصفيحتين. والطريقة الفاعلة لدرء تكوُّن هذه العيوب هي استخدام اللأْم بتغلغل السائل لتحقيق تصليد متجانس حرارياً لمادة الحشوة عند درجة حرارة اللأْم.

لقد صُنعت لوحة تبريد من مادة متدرّجة وظيفياً في خطوتين. في خطوة اللأْم الأولى، استُخدم الـ Nicrobraze #150 (Ni-15Cr-3.5B) كحشوة لَأْم معدنية. وحصل اللأْم بالتسخين حتى درجة حرارة تساوي 1075 مْ مدة 5 ساعات. وفي الخطوة التالية، جرى لَأْم لوحة تبريد من الفولاذ غير القابل للصدأ 304، و304 المتعدّد، وصفيحة نيكل، وصفيحة مادة متدرّجة الوظيفة باستخدام الـ 2 ـ BNi كحشوة لَأْم معدنية. وجرى اللأْم عند درجة حرارة تساوي 1030 مْ واستمر 5 ساعات.

## خواص المواد المتدرِّجة وظيفياً

تُستخدم المواد المتدرِّجة الوظيفة في بيئات قاسية عند درجات حرارة عالية، لأنها توفّر إمكان تقليل هدر المواد. إن تدرُّج النسبة الحجمية للجُسيْمات الصلبة خلال الطبقات يعني أن مفاعيل التغيّرات الحرارية المتكررة تكون أخفّ وطأة منها في كثير من منظومات المعدن والركيزة الشائعة الأخرى. ونظراً إلى أن هذه المواد توفّر مقاومة للاهتراء والتآكل (باستخدام حاضنة مقاومة للتآكل)، يُعتقد أنه يمكن أن تكون لها تطبيقات في بيئات درجات الحرارة المرتفعة، التي يتضمّن فيها اختيار المواد مقايضة بين مقاومة التآكل وقيمة عالية لمقاومة الخضوع. وقد أجرى ستارك (Stark) وزملاؤه[58] دراسة لاستقصاء مقاومة التآكل في طبقات مختلفة من مادة متدرّجة وظيفياً تألفت من جُسيْمات WC ضمن حاضنة Ni-Cr . وجرى النظر في أداء طبقات المادة المركَّبة المختلفة، كل على حدة، بغية تحديد تغيّرات معدّلات التآكل عبر البنية المتدرّجة. واستُقصيت مفاعيل درجة الحرارة والنسبة الحجمية للجُسيْمات الصلبة

وحجم الجُسيْمات الآكلة بواسطة مُحاكٍ مخبري لمعدّات تتآكل في بيئة سائلة. واستُخدم مجهر المسح الإلكتروني وقياس نقصان السماكة لتوصيف السطوح بعد تعرّضها للتآكل. وبينت النتائج أن معدّل التآكل عند درجة حرارة الغرفة كان في قيمته الدنيا عند نسب حجمية متوسطة من جُسيْمات الـ WC . إلا أن هذا السلوك انقلب حينما ازدادت أحجام الجُسيْمات. وبرغم أن نقصان السماكة تزايد مع زيادة درجة الحرارة عند جميع النسب الحجمية لجُسيْمات التقوية، فقد شوهد انخفاض في نقصان السماكة عند أعلى درجات الحرارة التي دُرست، بعد التعرُّض لجُسيْمات آكلة كبيرة وصغيرة (جُسيْمات $Al_2O_3$ مقاساتها 600 و200 ميكرون).

واستقصى توهغو (Tohgo) وساكاغوشي (Sakaguchi) وإيشي[59] (Ishii) مواد متدرّجة وظيفياً توزعت فيها جُسيْمات السيراميك ضمن الحاضنة المعدنية المطاوعة مع تغيّر خطي في نسبة الجُسيْمات الحجمية. وأُجريت تحاليل مرونة ولدانة للصدوع اعتماداً على طريقة جديدة لتحليل العناصر المنتهية[62][60].

واستقصى وِذَرهولد (Wetherhold) وسيلمان (Seelman) ووانغ[63] (Wang) استخدام المواد المتدرّجة وظيفياً للتحكّم بالتشوّه الحراري. إذا أردنا جعل التشوّه الحراري لمكوِّن ما أصغرياً أو متوافقاً مع التشوّه الحراري لمكوِّن آخر، فإنه يمكننا تحقيق ذلك باستخدام مادة مركَّبة، أليافها ذات عامل تمدّد حراري محوري سالب. وبتغيير نسبة الليف الحجمية ضمن جائز صفيحي متناظر لتكوين مادة متدرّجة وظيفياً، يمكن ضبط انفعالات حرارية معيّنة أو التحكُّم بها. وعلى وجه الخصوص، يمكن تصميم جائز لا ينحني عند حصول تغيّرات حرارية مستقرة عبر السماكة. وهذه النتيجة مستقلة عن قيمة درجة الحرارة الفعلية، ضمن حدود الخواص الثابتة للمكوّنات. ويمكن تصميم الجائز أيضاً ليتوافق مع عامل تمدّد حراري في المستوى، أو لمنع ذلك التمدّد، أو لتتوافق مع جساءة محورية مرغوب فيها. وبجمع

نوعين من الليف معاً لتكوين مادة هجينة متدرّجة وظيفياً يمكن تحقيق زيادات مرغوب فيها في الجساءة المحورية والجساءة إزاء الحَنِي مع الاحتفاظ بالسلوك المفيد للتشوّه الحراري.

وأجرى غوبتا (Gupta) وجينا[64] (Jena) سلسلة من الدراسات على مواد سيراميكية متدرّجة وظيفياً ذات بُنى مسامية متدرّجة التغيُّر تُستخدم على نحو متزايد في تطبيقات تقانية متقدمة. تعتمد كفاءة هذه المواد على البنية المسامية للطبقات كل على حدة، وتُوصَّف البُنى المسامية للمواد السيراميكية عادةً باستخدام قياس المسامية (Porosimetry)، أو قياس التدفّق المسامي (Flow Porometry) الذي يحصل التدفّق فيه موازياً لسماكة العيّنة المدروسة.

باستخدام تقنية جديدة قائمة على قياس التدفّق المسامي، جرى تحديد أكبر قطر للمسامات، والقطر الوسطي للمسام الناجم عن قياس التدفق، وتوزع مقاسات المسامات، وذلك لكل من طبقتَي مادة سيراميكية ثنائية الطبقات. بالمقارنة، لا يمكن استخدام قياس المسامية لقياس أيٍّ من خواص الطبقة الأولى. يمكن استخدام هذه التقنية الجديدة لتحديد البنية المسامية لطبقات تلك المواد إفرادياً بدقة بغية ضمان جودة المنتَج النهائي.

## تطبيقات المواد المتدرّجة وظيفياً

### زرع الأسنان

طوَّر الباحثون في جامعة طوكيو الطبية والسنية جذر سن صناعي باستخدام مادة متدرّجة وظيفياً مكوّنة بالدرجة الأولى من الأباتايت (Apatite) الشديد التوافق الحيوي مع العظام والتيتانيوم الذي يوفّر القوة اللازمة.

تُحضَّر الأسنان الصناعية اليوم من سيراميك الأباتايت ومعادن كالتيتانيوم. صحيحٌ أن الأباتايت متوافق حيوياً مع العظام، إلا أنه هش ويفتقر إلى القوة، في حين أن التيتانيوم أقوى من الأسنان الطبيعية، لكنه أقل توافقاً مع العظام. لذا حاول فريق البحث استغلال مزايا كلتا المادتين لصنع سن من مادة متدرّجة وظيفياً تتألف من الأباتايت والتيتانيوم، وقليل من المواد الأخرى.

وُضع مزيج مكوّن من نسب مختلفة من مساحيق التيتانيوم ومواد مركَّبة (أباتايت، زركونيا، كوارتز مصهور، بالاديوم) في قالب من المطّاط السليكوني، مع تغيير التركيز تدريجياً من أحد الطرفين حتى الطرف الآخر. وكُبست العيّنات بضغط يساوي 500 ـ 400 ميغا باسكال باستخدام سيرورة الكبس البارد المتساوي الضغط، ثم لُبِّدت في جو من شوارد الأرغون الموجبة بالتسخين التحريضي، الذي تولّده تردّدات عالية، حتى 900 ـ 1300 مْ.

تكوَّنت عيّنات المادة من محتوى متغيّر تدريجياً من التيتانيوم في أحد الطرفين حتى 9 في المئة من السيراميك في الطرف الآخر. وكانت قوة العيّنات المتدرّجة وظيفياً مماثلة تقريباً لتلك التي للعيّنات التي تحتوي على 9 في المئة من السيراميك.

وأُخضعت نماذج الأسنان الأولية لاختبارات مقاومة مختلفة. حين مزْج الأباتايت والتيتانيوم بنسبة 1:9، كانت مقاومة الضغط نحو 500 ميغا باسكال، ومقاومة الثني نحو 100 ميغا باسكال. وحين تطبيق الاختبارات على عيّنات مصنوعة من الأباتايت فقط، لم تتجاوز مقاومتا الضغط والثني بضع عشرات الميغا باسكال.

### مواد البناء

طوَّر تاكاهاشي[66] (Takahashi) بنجاح مادة متدرّجة وظيفياً

تمتص الرطوبة وتُحرِّرها مصنوعة من مادة متغيرة على نحو مستمر، أو كدرجات الدرج، مركَّبة من مكوِّنين هما الزيولايت، أو مادة تكييف الرطوبة القائمة على مادة خشبية قادرة على امتصاص وإطلاق الرطوبة، ومادة خرسانية إسمنتية قائمة على سليكات الكالسيوم. مقارنةً بالخشب والإسمنت، تستطيع هذه المادة امتصاص نحو ضعف ما يمتصانه من الرطوبة، وهي جيدة على وجه الخصوص في استجابتها الأولية لزيادة أو نقصان الرطوبة.

يُضاف إلى ذلك أن أبعاد هذه المادة ضئيلة التغيّرات مع التمدّد والتقلّص الناجمَين عن الرطوبة، وهي قوية ومنيعة على النيران، ومقاومة للتلف بالتجمد، ومطواعة لتغيير الشكل من لوح مسطح إلى زاوية منحنية. وباستخدامها مادة للبناء، ونظراً إلى خاصية التكيّف مع الرطوبة المتدرّجة من الجدار الخارجي إلى الجدار الداخلي، فإنها يمكن أن تلغي خطوات بناء زائدة، مسرِّعةً إنجاز البناء.

يمكن صنع هذه المادة على شكل قطع مساحة كل منها تساوي 300 مم$^2$، إلا أن الخطة المستقبلية هي متابعة البحث المشترك لإنتاج أبعاد أكبر تصل حتى 600 ملم × 900 مم، وإنتاج مواد مركَّبة إسمنتية مسامية لتقليص الوزن وزيادة العزل الحراري، وتطوير خط إنتاج كَمي.

## الحماية من الطلقات النارية

استقصى ما جان[67] (Ma Jan) استخدام المواد المتدرّجة وظيفياً في الحماية من الطلقات النارية، وتضمّن الاستقصاء معالجة منظومة $Ti\text{-}TiB_2$ متدرّجة وظيفياً بطريقة تعدين المسحوق. ودرس أثر حجم الجُسيْم الابتدائي ومساعد التلبيد في قابلية التلبيد والخواص الميكانيكية للمادة المتدرّجة وظيفياً.

ووجد أن حجم الجُسيْم الابتدائي الصغير سوف يحسِّن تكثُّف السيراميك، ومن ثَمَّ كل المادة المتدرِّجة وظيفياً. وأبدى كربيد السليكون، بوصفه مساعداً على التلبيد، تحسُّناً في قابلية طبقة السيراميك للتلبيد، وأدّى إلى تحسُّن هائل في كل من متانة المادة ومقاومتها للحني. وجرى التحقُّق من تكوُّن طَور TiB إبريّ الشكل بعد التلبيد، يُعتقد أن له إسهاماً كبيراً في الخواص الممتازة للمادة.

## مُحِسَّات الحرارة

استقصى بيترز (Peters) وزملاؤه[68] أنابيب مصنوعة من مواد متدرّجة وظيفياً مكوّنة من $MoSiO_2$ و$Al_2O_3$، وهما مادتان مستقرتان ترموديناميكياً وتتحملان درجات الحرارة العالية، وتتصفان بمُعاملي تمدّد حراري متقاربين. ويمكن استخدام المواد المركَّبة المصنوعة من هذه الأنابيب في تطبيقات من قبيل أغماد حماية محِسَّات درجات الحرارة العالية.

تُستخدم طلاءات البلاتين على نطاق واسع في طلاء الأغماد المصنوعة من الـ $Al_2O_3$ في المزدوجات الحرارية والمستخدمة في صناعة الزجاج في الولايات المتحدة، وذلك لحماية أسلاك المزدوجات الحرارية والأغماد من التآكل، وحماية وحدة تحسُّس درجات الحرارة من التفكُّك. لكن تكلفة الطلاء بالبلاتين عالية جداً بسبب الإجراءات الواجب اتخاذها في معمل الزجاج لخزن وحماية البلاتين. يُضاف إلى ذلك أن ثمة حاجة أيضاً إلى تحسين أداء الأغماد المطلية بالبلاتين، لأن معدّل تلف المزدوجات الحرارية يمكن أن يصل حتى 50 في المئة. وقد دفعت هاتان المشكلتان صناعة الزجاج إلى البحث عن بديل يمكن أن يحل محل البلاتين، ويستطيع تحقيق عمر أطول وأداء جيد من حيث تحمُّل بيئة صناعة الزجاج القاسية جداً.

يُعدُّ البخ البلازمي طريقة فاعلة لإنتاج الطلاءات من المواد المركَّبة $MoSi_2$ و$Al_2O_3$، والمكوِّنات التي تُشكَّل بالبخ[69]. على سبيل المثال، تبين دراسات أنابيب حقن الغاز المشكَّلة بالبخ البلازمي للمنظومة $MoSi_2$-$Al_2O_3$ أن تلك الأنابيب تتصف بمقاومة جيدة للصدمة الحرارية عند درجات الحرارة العالية عند تغطيسها في نحاس وألمنيوم مصهورين[70]. إن هذه الأنابيب المركَّبة تبُزُّ أنابيب الغرافيت وكربيد السليكون عند تغطيسها في النحاس المصهور، ولها أداء مماثل لأداء الغرافيت العالي الكثافة والموليت (Mullite) حين تغطيسها في الألمنيوم المصهور.

أسهمت آليات امتصاص الطاقة، ومنها فك الارتباط (بين طبقتي الـ $MoSi_2$ و$Al_2O_3$) والتصدّع الميكروي في طبقة الـ $Al_2O_3$، في مقدرة المادة المركَّبة على امتصاص طاقة الانفعال والإجهادات الحرارية في أثناء اختبارات الأداء، والـ $MoSi_2$ و$Al_2O_3$ متوافقان كيميائياً ولهما مُعَاملا تمدّد حراري متقاربان[72][71].

يبيّن الشكل 8 ـ 18 منحنيَيْ توزّع مقاومة الانهيار في مادة ذات تدرّج وظيفي طبقي، وأخرى ذات تدرّج مستمر. تمتلك البنيتان الميكرويتان للمادة في الحالتين قيمتين متوسطتين متماثلتين للمقاومة $\sigma_f$ (70 ميغا باسكال) محسوبة باستخدام علاقة توزُّع وايبُل (Weibull Distribution) الإحصائي:

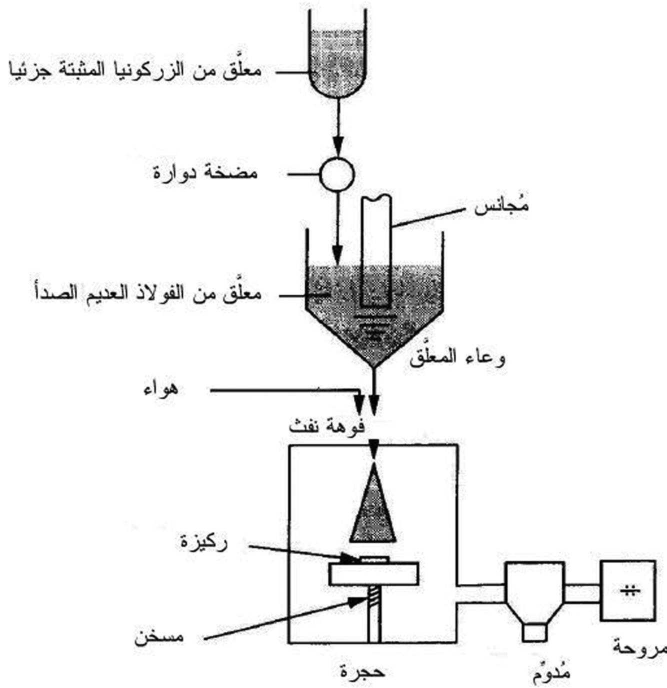
$$\sigma_f = a^{-1/\beta}\, \Gamma\, [1 + 1/\beta]$$

حيث $\beta$ هو معامل وايبُل و $\Gamma$ تابع لحجم العينة[73].

من الواضح أن تبعثر نتائج المادة المستمرة التدرّج أقل، وهذا ما جعل ميل المنحني أشدّ (13.38 للعيّنات المستمرة التدرّج و7.635 لعيّنات التدرّج الطبقي). أما طاقة تصدّع المادة (التي تتحدّد كمّياً بالمساحة الموجودة تحت منحني الإزاحة الناجمة عن الحمل في

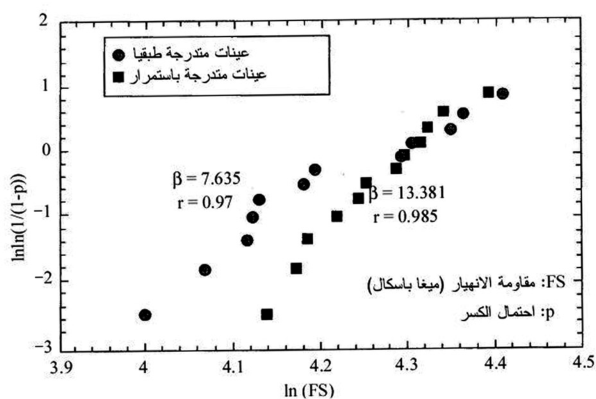
اختبارات الحلقة المفتوحة (c-Ring Tests) فهي أكبر كثيراً (بنحو 3 مرات) من تلك التي للـ $MoSi_2$ و$Al_2O_3$ الجَسِيمان.

احتوت سطوح تصدّعات المادتين الطبقية والمستمرة التدرّج تصدّعات ميكرويّة وخشونة كثيفة. ويُعتقد أن المتانة الزائدة في المادة كانت نتيجة مباشرة للتصدّعات الميكرويّة. وتشير نتائج هذا العمل إلى أن قوة ومتانة الأنابيب المتدرّجة وظيفياً تحقّق متطلبات الأداء في هذا التطبيق.



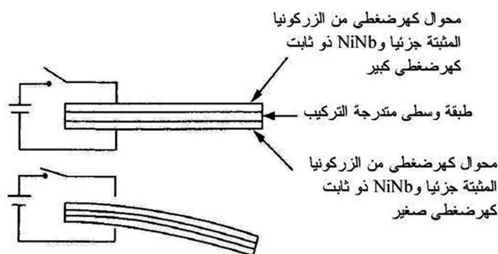

**الشكل 8 ـ 17: مخطط توضيحي لجهاز مؤتمت لمراكمة المسحوق. لتغيير نسبة مزج المعدن (فولاذ عديم الصدأ) والسيراميك (زركونيا مثبتة جزئياً) يُغيَّر معدل تدفق معلق مسحوق السيراميك من خلال التحكُّم بسرعة المضخة الدوارة بواسطة معالج صغري.**

جرى تحضير مفعِّل بالربط التغلغلي (Diffusion Bonding) لصفيحتين لهما ثابتان كهروضغطيان مختلفان ضمن نظام من محوال كهروضغطي من النمط PZT مع NiNb. أدّت الطبقة الوسطى المتدرّجة التركيب، التي لُصقت بالشَيّ لتخفيض الإجهاد المتبقّي بين الصفيحتين، إلى وثوقية أعلى في المادة بوصفها مفعِّلاً. يبيّن الشكل 8 ـ 19 رسماً توضيحياً للمفعِّل المحضَّر بهذه الطريقة.




**الشكل 8 ـ 18: نتائج اختبارات الحلقة المفتوحة التي أُجريت على طلاءات $Al_2O_3$-$MoSi_2$ متدرجة طبقياً وباستمرار.**

**ملاحظة: حذف المترجم بيانات تدريجات المحور العلوي لعدم انسجامها مع بيانات المحور السفلي.**




**الشكل 8 ـ 19: بنية مفعِّل كهرضغطي من مادة متدرجة وظيفياً.**

# الهوامش


1. L. M. Sheppard, «Enhancing Performance of Ceramic Composites,» *Am. Ceram. Soc. Bull.*, vol. 71, no. 4 (1992), pp. 617-631
2. M. Koizumi, «Recent Progress of Functionally Gradient Materials in Japan,» *Proc. 16th Ann. Conf. Composites Adv. Ceram. Mater.*, M. Mendelson, Am. Ceram. Soc., pp. 333-347, January 7-10, 1992, Cocoa Beach, FL.
3. M. M. Schwartz, *Emerging Engineering Materials, Lancaster*, PA: Technomic Publishing Company, 1996, p. 292
4. Report from Science and Technology Agency of Japanese Government of «Research on the Basic Technology for the Development of Functionally Gradient Materials for Relaxation of Thermal Stress,» 1987.
5. M. A. Steinberg, *New Materials in the Aerospace Field*, Science Japanese Edition Nikkei Sci. Inc., Tokyo, 1986, pp. 29-35.
6. Y. Fukui and Y. Watanabe, «Analysis of Thermal Residual Stress in a ThickWalled Ring of Duralcan-Base AI-SIC Functionally Graded Material,» *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, 27(12), 4145-4151 (1996).
7. G. Sacks, *Z. Metallkd.*, 19, 352-357 (1927).
8. H. Kimura and K. Toda, Design and Development of Functionally Graded Material by Pulse Discharge Resistance Consolidation with TemperatureGradient Control, *Powder Metall.*, 39 (1), 59-62 (1996).
9. H. Kimura and S. Kobayashi, in O. Izumi (ed.), *Intermediate Compounds*, Sendai: Japan Institute of Metals, 1991, p. 985.
10. H. Kimura and S. Kobayashi, *J. Jpn. Inst. Met.*, 58, 291 (1994).
11. H. Kimura and S. Kobayashi, *Mater. Trans. JIM*, 36,982 (1995).
12. T. Hirano, T. Yamada, et al., Fundamental Design, Multiobjective Optimization for FGM, FGM - 91 Sym., October 8-9, 1991, pp. 15-29.

13. Y. Obata and N. Noda et al., Steady State Thermal Stress in FGM Plates, FGM' 91 Sym., October 8-9, 1991, pp. 36-44.
14. Y. Matsuzaki, M. Kawamura [et al.], Fundamental Studies of TiAl-Based FGMs, FGM' 96 Sym., October 8-9, 1991, pp. 45-59.
15. A. Kawasaki and R. Watanabe, Powder Metallurgical Fabrication of the Thermal-Stress Relief Type of Functionally Gradient Material, «Sintering '87 Tokyo,» Somiya et al. (eds.) London: Elsevier, 2, 1197-1202, 1988.
16. K. Watanabe, A. Kawasaki, and N. Murahashi, Fabrication of Thermal Stress Relief Type of Functionally Gradient Material in Molybdenum/Zirconia System, J. Assoc. Mater. Eng. Res., 1, 36-44, 1988.
17. T. Fukushima, S. Kuroda and S. Kitahara, Gradient Coatings Formed by Plasma Twin Torches and Those Properties, Proc. First Intl. Sym., FGM, Sendai, pp. 145-150, 1990.
18. N. Shimoda, S. Kitaguchi, T. Saito, H. Takigawa, and M. Koga, Production of Functionally Gradient Materials by Applying Low-Pressure Plasma Spray, Proc. First Intl. Symp., FGM, Sendai, pp. 151-156, 1990.
19. N. Sata, N. Sanada, T. Hirano, and M. Niino, Fabrication of a Functionally Gradient Material by Using a Self-Propagating Reaction Process, Proc. First Intl. Symp. on Combustion and Plasma Synthesis of High- Temperature Materials, VCH Publishers, pp. 195-203, 1990.
20. Y. Miyamoto, H. Nakanishi, 1. Tanaka, T. Okamoto, and O. Yamada, Gas Pressure Combustion Sintering of TiC-Ni FGM, Proc. First Intl. Symp., FGM, Sendai, pp. 257-262, 1990.
21. O. A. Voronov and G. S. Tompa, Functionally Graded Nanophase Be/Cu Composites, L.B. Johnson Space Center, NASA Tech Briefs, November 2003, p.52.
22. T. Nagano and F. Wakai, Fabrication of Zirconia-Alumina Functionally Gradient Material by Superplastic Diffusion Bonding, J. Mater. Sci., 28(21), 5793-5799, 1993.
23. S. Nakashima, H. Arikawa, M. Chigasaki et al., $ZrO_2$ and Cu Functionally Gradient Materials Prepared by a Dynamic Ion Mixing Process, Surface and Coatings Technol., 66(1-3), 330-333, 1994.

24. J. H. Abboud, R. D. Rawlings, and D. R. F. West, Functionally Gradient Layers of Ti-Al-Based Alloys Produced by Laser Alloying and Cladding, *Mater. Sci. Technol.,* 10(5),414-419, 1994.
25. K. M. Jasim, R. D. Rawlings, and D. R. F. West, Metal-Ceramic Functionally Gradient Material Produced by Laser Processing, *J. Mater. Sci.,* 28,2820-2826, 1993.
26. H. Takebe and K. Morinaga, «Fabrication of Zirconia-Nickel Functionally Gradient Materials by Slip Casting and Pressureless Sintering,» *Mater. Manufact. Proc.,* 9(4), 721-33 (1994).
27. K. Takebe and K. Morinaga, *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 98, 1250 (1990).
28. K. Morinaga, K. U. Toto, «Fabricate Thick Alumina- Tungsten FGM Using Slip Cast Method,» *Sci. Technol.* (December 1993), p. 4.
29. H. H. Grazzini and D. S. Wilkinson, Slip Casting Under Pressure, Dept. of Mater. Sci. and Engrg., McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4L7, Canada, Proc. *16th Ann. Conf on Composites & Advanced Ceram. Mater.,* M. Mendelson, Am. Ceram. Soc., pp. 408-418, January 7-10,1992, Cocoa Beach, FL.
30. M. E. O'Day, L. C. Sengupta, E. Ngo et al., Processing and Characterization of Functionally Gradient Ceramic Materials, ARL- TR-337, Army Research Lab., Adelphi, MD, February 1994, p. 19.
31. R. E. Mistier, «Tape Casting: An Enabling Fabrication Technology,» *Ceram Ind.*, 27-30 (2000).
32. K. Atarashiya K. Kurokawa and T. Nagai, «Functionally Gradient Material of the System Ni-MgO, Ni-NiO, Ni-$Si_3N_4$ or Al-AIN by Pressureless Sintering Hokkaido University, Japan, and M. Uda, Nisshin Steel Co., Ltd., Japan, *Proc. 16th Ann. Conf. on Composites & Advanced Ceram. Mater., M. Mendelson,* Am. Ceram. Soc., pp. 400-407, January 7-10,1992, Cocoa Beach, FL.
33. «Functionally Gradient Al-Based Amorphous Alloys,» *JETRO*, 22(2), 17 (1994).
34. Y. Miyamoto, «Economic Process for Rapid Densification of Ceramics, Metals, and Functionally Gradient Materials,

Processing Research Center for High Performance Materials, Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Ibaraki, Osaka 567, Japan, 8(5/6) (May /June 1993), and Functionally Gradient Materials by SHS/HIP, JETRO, 21(4), 30 (1993).
35. S. Inoue, H. Uchida [et al.], Preparation of Compositionally Gradient TI- TIN Films by R. F. Reactive *Sputtering Thin Solid Films*, 261(1-2), 115-119 (1995).
36. G. Carman, «Functionally Graded Thin Film Shape Memory Alloy Micro- *Actuators AFRL Technol. Horizons* (September 2002), pp. 38-39.
37. X. Ma, [et al.], «Fabrication of TiC/Ni Functionally Gradient Materials and Their Mechanical and Thermal Properties, *Proc. 16th Ann. Conf on Composites & Advanced Ceram. Mater.,* M. Mendelson, Am. Ceram. Soc., pp. 356-364, January 7-10, 1992, Cocoa Beach, FL.
38. J. Dongliang [et al.], «SiC-$Si_3N_4$ Gradient Composite Ceramics by Special HIP Processing, Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica, Developments in Science and Technology of Composite Materials, Proc. Fourth European Conf. on Composite Materials (Stuttgart), Sep. 25-28, 1990, European Association for Composite Materials, Elsevier, ECCM-4, pp. 416-423.
39. H. J. Feng and J. J. Moore, «The Effect of Pressure on the Combustion Synthesis of a Functionally Graded Material: $TIB_2$-$Al_2O_3$-Al Ceramic Metal Composite System,» *ASM Int.,* JMEPEG, *J. Mater. Eng. Performance*, 2(5), 645-650 (1993).
40. N. Sata and Y. Miyamoto, «FGMs Via Self-Propagating High-Temperature Synthesis,» *Mater. Proc. Report* (March/ April 1992), pp. 4-5.
41. «Functionally Gradient Material Made of Glass and Metal,» *JETRO, New Tech. JAPAN*, 21(2) (May 1993).
42. *Science & Technology* (28 May 1993), p. 74.
43. P. Sarkar, X. Huang and P. S. Nicholson, «Zirconia/ Alumina Functionally Gradiented Composites by Electrophoretic Techniques,» *J. Am. Ceram. Soc.*, 76(4), 1055-1056 (1993).
44. D. P. Miller, J. J. Lannutti and R D. Noebe, «Fabrication and Properties of Functionally Graded NiAl/ $Al_2O_3$,» *Composites, J. Mater. Res.*, 8 (8), 2004-2013 (1993).

45. R. R. Bowman, *Intermetalic in D.B. Miracle, D.L. Anton, and J. A. Graves (eds), Matrix Composites II, Mater. Res. Soc. Symp. Proc.,* 273, Pittsburgh, PA, 1992.
46. «Supersonic Particle Process for Making Bulk Functionally Gradient Material,» JETRO, New Tech. JAPAN, 21(7) (October 1993).
47. A. Bishop [et al.], «A Functionally Gradient Material Produced by a Powder Metallurgical Process,» *J. Mater. Sci. Lett*., 12 (19), 1516-1518 (1993).
48. R. Watanabe, «FGMs Via Powder Spray Forming,» *Mater. Proc. Report* (March/April 1992), pp. 3-4.
49. S. Erglu [et al.], «Synthesis of Functionally Gradient NiCr-Al/MgO-$ZrO_2$ Coatings by Plasma Spray Technique,» *J. Mater. Sci. Lett*., 12 (14), 1099-1102 (1993).
50. A. Bennett, *Mater. Sci. Technol*., 2, 257 (1986).
51. N. Shimoda, «FGMs Via Low Pressure Plasma Spraying,» *Mater. Proc. Report* (March/ April 1992), pp. 3-4.
52. T. N. McKechnie and E. H. Richardson, «Continuous Spray Forming of Functionally Gradient Materials, Sandia National Labs, Albuquerque, NM, 1995, 6 p, SAND-95-2649C, C, CONF-9509182-1O, 1995 National Thermal Spray Conference, Houston, TX, 11-15 Sep 1995; NTIS Alert, 96(12), 24, 1996.
53. T. Nagano and F. Wakai, «Fabrication of Zirconia-Alumina Functionally Gradient Material by Superplastic Diffusion Bonding. Research and Development Corporation, Takatsuka-cho, Japan, *J. Mater. Sci.,* 28, 5793-5799, 1993.
54. T. Nagano, H. Kato and F. Wakai, *J. Mater. Sci*., 26, 4985 (1991).
55. Y. Kude, « FGMs Via Chemical Vapor Deposition, Mater. Proc. Rept., Nippon Oil Co., Ltd., Elsevier, March/ April 1992, pp. 2-3.
56. R. Kudesia, S. E. Niedzialek, G. C. Stangle, J. W. McCauley, R. M. Spriggs, and Y. Kaieda, Design and Fabrication of TiC/NiAl Functionally Gradient Materials for Joining Applications, Proc. 16th Ann. Conf on Composites & Advanced Ceram. Materials, M. Mendelson, Am. Ceram. Soc., pp. 374-383, January 7-10, 1992, Cocoa Beach, FL.
57. C. Fujiwara, S. Nagata, S. Kiyotoh et al., Functionally Gra-

dient Materials Symp., Selected papers; Science and Technology, pp. 60-69, October 2, 1992, p. 163, and Fabrication Process for Actively Cooled FGM Plate, Tokyo FGM '91, in Japanese, October 8-9, 1991, pp. 235-243.
58. M. M. Stack, J. Chacon-Nava, and M. P. Jordan, Elevated-Temperature Erosion of Range of Composite Layers of Ni-Cr-based Functionally Graded Material, Mater. Sci. Technol., 12(2), 171-177, 1996.
59. K. Tohgo, M. Sakaguchi and H. Ishii, «Applicability of Fracture-Mechanics in Strength Evaluation of Functionally Graded Materials,» *JSME Intl. J. Ser. A Mech. Mater. Eng.*, 39(4), 479-488 |(1996).
60. K. Tohgo and T. W. Chou, «Incremental Theory of Particulate-Reinforced Composites Including Debonding Damage,» *JSME Intl. J. Ser - A.,* 39(3), 389 (1996).
61. K. Tohgo and G. J. Weng, «A Progressive Damage Mechanics in Particle - Reinforced Metal Matrix Composites Under High Triaxial Tension,» *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, 116, 414 (1994).
62. K. Tohgo, N. Suzuki and H. Ishii, «Influence of Debonding Damage on a Crack Tip Field in Particulate-Reinforced Ductile-Matrix Composite,» *Intl. J. Damage Mech.*, 5, 150 (1996).
63. R. C. Wetherhold, S. Seelman and J. Z. Wang, «The Use of Functionally Graded Materials to Eliminate or Control Thermal Deformation,» *Comp. Sci. Technol.*, 56 (9), 1099-1104 (1996).
64. N. Gupta and A. Jena, «Measuring in Layers,» *Ceram. Ind.*, 24-29 (2001).
65. «Dental Implant Using Functionally Gradient Material,' *New Tech. Jpn.*, JETRO, 20(11), 17 (1993).
66. H. Takahashi and U. Tohoku, «Group Develops Moisture Absorbent/Proof Functionally Gradient Material,» *Sci. Technol.* (21 December 1993), p. 3.
67. M. Jan, «Ballistic Protection Application of FGMs,» (6 May 2003), p. 1, www.ntu.edu.sg/sme/research/res_cer - 6.htm.
68. M. I. Peters [et al.], «Functionally Graded $MoSi_2$-$Al_2O_3$ Tubes for Temperature-Sensor Applications, *Industrial Heating,»* (October 2001), pp. 105-110.
69. R. G. Castro, H. Kung, K. J. Hollis, and A. H. Bartlett,

15th Intl. Thermal Spray Conf., Nice, France, May 25-29, 1998, pp. 1199-1204.
70. A. H. Bartlett [et al.], *«Industrial Heating,»* (January 1996), pp. 33-36.
71. R. U. Vaidya [et al.], *Acta Metallargica*, 46, 2047-2061 (1998).
72. W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, Second Ed. (New York: John Wiley & Sons, 1976).
73. W. A. Weibull, *J. Appl. Mech.*, 18 (3), 293 (1951).

# المراجع

Amada, S., T. Munekata and Y. Nagase. «The Mechanical Structures of Bamboos in Viewpoint of Functionally Gradient and Composite-Materials.,» *J. Comp. Mater,: 30 (7), 800-819, 1996.*

Atarashiya, K. «Joining Metals to Ceramics Using FGMs.,» *Mater. Proc. Rept.,* Hokkaido University.,» Elsevier. March/April 1992, pp. 5-6.

Bhaduri, S. B. and R. Radhakrishnan. «Characterization of Functionally Gradient Materials in the Ti-B-Cu System.,» *Proc. 16th Ann. Conf on Composites & Advanced Ceram. Materials,*

Mendelson, M., *Am. Ceram. Soc.*,, January 7-10, 1992, pp. 392-399, Cocoa Beach, FL.

Fujii, K., J. Nakano and M. Shindo, «Development of Oxidation Resistant SiC/C Compositionally Gradient Materials, JAERI-M-94-001, Japan Atomic Energy Research Inst., Tokyo.,» *NTIS Alert*: 95(12), 12, 1995.

Gupta, V. and A. K. Jena. «Advances in Filtration and Separation Technology.,» 13b, 833-844, 1999.

Hirano, T., T. Yamada and J. Teraki, «Functionally Gradient Materials Symp., Selected Papers; Sci. Technol., Japan, JPRS-JST-92-025, pp. 15-27, October 2, 1992, p. 163, and Fundamental Design, Multiobjective Optimization for FGM,

Tokyo FGM '91, in Japanese, October 8-9, 1991, pp. 199-208.

«Improved Shuttle Tile.,» *Aerospace Engr.*: June 1994, p. 28.

Jena, A. K. and K. M. Gupta. *J. Power Sources*: 80, 46-52, 1999.

Miller, D. P., J. J. Lanutti and R. N. Yancey. «Functionally Gradient NiAl/ $Al_2O_3$ Structures, Proc. 16th Ann. Con! on Composites & Advanced Ceram. Materials, M. Mendelson, Am. Ceram. Soc., pp. 365-373, January 7-10, 1992, Cocoa Beach, FL.

X. Wang, E. A. Olevsky, and M. A. Meyers, Synthesis of Functionally Graded Nanomaterials by Electrophoretic Deposition and Microwave Sintering, SAMPE 2004 National Meeting, Session 6B, San Diego, CA, November 18, 2004.

# 9

# النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

## تقديم

عندما تصطدم سيارة بأخرى، تكشف تجهيزة صغيرة تسمّى مقياس التسارع (Accelerometer) تغيُّر السرعة، وتُطلق الوسادة الهوائية، ذلك الاختراع الذي أنقذ حياة الكثيرين.

يُعدُّ مقياس التسارع واحداً من أكثر النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة (MicroelecroMechanical Systems) (MEMS) استخداماً، إلا أن العلماء والمهندسين بدأوا أيضاً باستخدام تلك النُظم في تجهيزات تمتد من مُجِسَّات الضغط في عمليات توسيع الأوعية الدموية، حتى منظمات نبض القلب (Pacemakers)، وحتى سوّاقات الأقراص الضوئية.

النُظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، المعروفة أيضاً بالآلات الميكرويّة، هي تقانة جديدة نسبياً تَستخدم طرائق تصنيع الإلكترونيات الميكرويّة الموجودة حالياً لصنع آلات معقّدة ذات مقاسات ميكرومترية. وهي تمثّل مكوِّناً متسارعَ النمو في صناعة أنصاف النواقل.

يحتوي كثير من الآلات الميكرويّة على أجزاء متحركة إلى جانب الدارات المتكاملة. وعلى غرار معظم التجهيزات التقانية المتقدمة، يجب صنعها بأبعاد دقيقة، ومن مواد ذات خواص تجعلها

تعمل على نحو صحيح. ولمساعدة المصنِّعين على ضمان أن تجهيزاتهم تحقّق تلك المواصفات الدقيقة، قام علماء ومهندسو هيئة المقاييس والتقانة (National Institute of Standards and Technology) (NIST)، بتطوير ثلاثة مقاييس دولية، لمصلحة الجمعية الأميركية لمقاييس المواد واختباراتها (American Society for Testing and Materials) (ASTM)، تخص طرائق اختبار الأغشية الرقيقة المستخدمة في الآلات الميكرويّة.

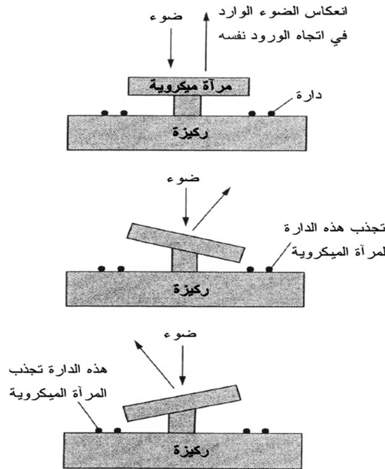
نُشرت إجراءات الاختبار، وهي الأولى من نوعها في العالم، في الكتاب السنوي للجمعية الأميركية لمقاييس المواد واختباراتها (*The Annual Book of ASTM International Standards*) في عام 2003. وكان الغرض من تلك المقاييس هو تسهيل التجارة العالمية في مجال تقانات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، وذلك بالتمكين من إجراء القياسات التي سوف تؤدّي إلى تطوير نُظم كهروميكانيكية ميكرويّة أكثر وثوقية وقابلة للإنتاج المتكرر بالمواصفات نفسها. وتتضمّن المقاييس الثلاثة تعليمات تفصيلية لقياس أبعاد الأغشية الرقيقة و«انفعالها»، وهو خاصية ذات صلة بالإجهاد في الغشاء الرقيق. وافتُتح موقع في الوِب أيضاً[1] لمساعدة مصنِّعي أنصاف النواقل على إجراء الحسابات الرياضية المعقّدة التي تتطلبها طرائق الاختبار الجديدة المحدّدة في تلك المقاييس.

## ما هي النُظم الكهروميكانيكية الميكرويّة؟

لو سيطر أقزام جوناثان سويفت على الإلكترونيات، لبدت الأجزاء الداخلية لأدواتهم كالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. تَحشُر هذه النظم مجموعات كاملة من المسنّنات والنوابض والمرايا ضمن رقاقة لا تزيد مقاساتها على بضعة ميليمترات. وهي مكوِّنات مفتاحية

من قائمة متنامية من المجِسَّات، ونظراً إلى أنها تُبنى باستخدام الطرائق نفسها المستخدمة لصنع رقاقات الحاسوب، فإنها رخيصة كتلك الرقاقات، وسهلة الإنتاج كمياً.

تُصنع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة من أنصاف نواقل ومواد متوافقة معها باستخدام تقنيات الطباعة الضوئية. تُحفَر كيميائياً بُنى ميكانيكية صغيرة، بقدر يكفي لثنيها بمجال محدود من الزوايا، من بُنى طبقية، وتبقى معلقة فوق ركيزة. وتتحكَّم دارات إلكترونية على الركيزة بحركتها، وذلك بتطبيق جهود أو تيارات تولِّد قوى كهروساكنة أو مغنطيسية تجذب أجزاء من المكوِّن المرن (انظر الشكل 9 ـ 1). وفي تجهيزات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الضوئية المعروفة جيداً، تتمثَّل الأجزاء المتحرّكة بمرايا تُمال أو تُحرَّك عمودياً. ومن المكوّنات الضوئية الأخرى عدسات ميكرويّة وأدلة موجية ضوئية.




**الشكل 9 ـ 1: في هذه التجهيزة الإلكتروميكانيكية الضوئية الميكروية يؤدي تيار مار عبر الركيزة، أو شحنة متراكمة عليها، إلى جذب مرآة وإمالتها، وإلى حني العمود الحامل لها.**

وبرغم ضآلة هذه التجهيزات، فهي كبيرة جداً على اعتبارها نانوية. وبرغم صغرها كذرّات الغبار، فقد استحوذت على اهتمام كبير. إن هذه التجهيزات التي كانت يوماً ما مجرّد ابتكار مخبري، تُعتبر الآن آلات ميكرويّة عاملة تُستخدم فيها المضخّات والصمّامات والدعامات والمسنّنات والمفاتيح الميكانيكية لأداء المهام الفيزيائية. وقد بدأت الآن بالظهور في تطبيقات تجارية من قبيل الإلكترونيات الاستهلاكية ونظم السيارات. والجديد المثير فيها هو أن تقانات تصنيع رخيصة، تَسُكُّ تجمُّعات ميكانيكية ميكرويّة الحجم بالطريقة نفسها التي تُحفر بها الدارات على السليكون لتكوين الرقاقات الحاسوبية. ثمة فوهات (منافث) كهروميكانيكية ميكرويّة موجودة قيد الاستخدام الفعلي في طابعات نفث الحبر. وتُخبر مُحِسَّات السرعة الكهروميكانيكية الميكرويّة السيارة باللحظة التي عليها فيها فتح وسائد الهواء الواقية. أما الفرص غير المستغلة حتى الآن فتكمن في حقل الطب والاتصالات، حيث يمكن للمضخّات الميكرويّة توفير نظم تزويد بالدواء مُتحكَّم بها بدقة، في حين أن البدّالات الضوئية الميكرويّة يمكن أن تخفِّض تكاليف وتعقيد شبكات الألياف الضوئية.

تُعدُّ النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، وهي التقانة التمكينية لعدد من النظم المهمة للقوى الجوية والأمن القومي، جوهرية للتصغير والمكاملة، ولتحسين إمكانات النظم العسكرية الفضائية. وهي مهمة جداً أيضاً للصناعة المدنية، ومن الأمثلة على ذلك الأقمار الصناعية الصغيرة والمفعِّلات والجايروسكوبات وبدّالات الأمواج الميكرويّة ومقاييس التسارع والمُحِسَّات ونظم التحكُّم بالتدفّق الهوائي ومحرّكات الطائرات ذات العنفات والطائرات المسيّرة غير المأهولة. وهي نظم صغيرة جداً تُصنَّع كمياً على دفعات، وتتألف من مكوّنات إلكترونية وميكانيكية في المجال الممتد من السلّم

الميليمتري حتى السلّم النانوي. أما مزيتها الأساسية، بالمقارنة مع النُظم الأخرى، فهي إمكان تصغير الأحجام وتخفيف الوزن وتخفيض استهلاك الطاقة وتكاليف النظم الجوية الفضائية والفضائية إلى حد بعيد. ومن التقانات المستخدمة في صناعتها الطباعة الضوئية والتشغيل الميكروي، الحجمي والسطحي، والحفر الكيميائي وتوضيع الأغشية والتعليب. ومن أمثلة المواد الإنشائية التي تُستخدم في بنائها البولي سليكون وكربيد السليكون والـ $Si_3N_4$ والألماس.

ويمكن للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة أن تحسّن الإمكانات التي تؤثّر في أمان الطيران ونجاح المهمات الجوية. وهذا صحيح للتشخيص على متن القمر الصناعي وإعادة تشكيل موسّطاته، على وجه الخصوص. إلا أن الباحثين يُدركون أن حماية تلك التجهيزات، من الاحتكاك والاهتراء والامتصاص والالتصاق، والظواهر الأخرى التي تسيء إلى أدائها وتقصّر من عمرها، تمثّل تحدّياً كبيراً.

## تصميم النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

السؤال الآن هو أنه عندما تُفتح بوابات الفيضان ويتدفّق المزيد من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة إلى الصناعة المدنية، مَن سوف يصنّعها، وما هو مقدار الضآلة التي سوف تبلغها؟ يمكن للتصاميم الخاصة بالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تحقيق تلك النظم على رقاقات تحتوي على مرسِل ومستقبِل وبطاريات ومُحِسَّات ومعالجات صغرية، وهذه تمثّل مجتمعة مكوِّناً واحداً لا يزيد مقاسه كثيراً على طابع بريدي. لكن الأمر المهم هنا هو تصميم كل قطعة صغيرة من النظام على حدة، والتيقُّن من أنها قابلة للتصنيع وقادرة على العمل.

المُدهش في النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة أنها متينة

وتستطيع العمل لفترات طويلة باستهلاك مقدار قليل من الطاقة. لكن عليها أن تتحمَّل التراكم الحراري الداخلي المؤذي والأحمال البنيوية المفرطة وتغيّرات حرارة المحيط والاهتزاز والصدم العنيف.

إن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تقانة فريدة، ولذا سوف تكون هناك دائماً تحدّيات تصميمية فريدة. من أجل كل تجهيزة تجارية من تلك التجهيزات التي يجري تطويرها، ثمة حاجة إلى تطوير التجهيزة نفسها، إضافةً إلى تطوير سيرورة تصنيعها. والتحدّي الآخر هو أن كل تجهيزة منها تتطلب عدداً من التخصصات الهندسية. فمن أجل تكوين تجهيزة جديدة، تحتاج الشركة إلى مهندس كيميائي، ومهندس سيرورات، ومهندس ميكانيك، ومهندس كهرباء، ويُحتمل أن تكون ثمة حاجة إلى مهندس سوائل، أي ثمة حاجة إلى تنوع شديد من الخبرات.

وتتضمّن تلك الخبرات المقدرة على محاكاة وتحليل الكيفية التي سوف تعمل بها التجهيزة. حتى إن منتِجي البرمجيات بدأوا فعلاً بالنظر في تطوير وإنتاج أدوات برمجية خصّيصاً للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة.

على سبيل المثال قامت إحدى شركات تطوير برمجيات المحاكاة، القائمة على طريقة تحليل العناصر المنتهية، بتضمين برمجياتها أدوات محاكاة للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. يربط الحل الذي تقدمه الشركة التحليل الكهروساكن بالتحليل البنيوي مع واجهة مستخدم بيانية تعمل مع كثير من برمجيات التصميم بمساعدة الحاسوب، وتتضمّن أداة بناء نماذج قائمة على طريقة تحليل العناصر المنتهية. وسوف يمكِّن هذا الحل المهندسين من تصميم التجهيزات التي يُتوقَّع أن تجعل الجيل التالي من المنتجات الإلكترونية أذكى وأرخص.

إلى أي مدى يمكن تصغير النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة بوجود كل هذه الخبرات الهندسية؟ نظرياً، لا يوجد حد أدنى للحجم، إلا أن ثمة قيوداً عملية. فالكتلة العطالية هي من حيث الجوهر الشيء الذي يظهر فيه أثر الثقالة أو التسارع في مقياس التسارع. فإذا كنت مهتماً بتصغير الحجم، فإنك تستطيع دائماً جعل مقاييس التسارع أصغر. إلا أن حساسية المقياس تكون أفضل إذا كانت الكتلة أكبر. من ناحية أخرى، ثمة توجه لدى الصناعة نحو جعل تلك الأشياء أصغر.

إلا أن الفيزياء هي التي سوف تحدِّد في النهاية أصغر حجم ممكن، وإمكانات المواد المستخدمة. أما من الناحية العملية، فإن التطبيقات هي التي سوف تحدِّد مقدار صِغَر الأشياء الملائم لها.

## أنواع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

أحد أنواع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة هو مُحِسٌّ يُعرَف باسم الدعامة الميكرويّة، وهو يشابه صفّاً من الصفائح أو الملاعق المتدلية التي يهتز كل منها تلقائياً. ويمكن لهذه المحِسَّات أن تكون رقيقة جداً إلى حد أنه يمكن وضع مئة منها بسهولة ضمن شعرة إنسان. ويُطلى أحد جانبي الصفيحة بمادة كيميائية تلتصق نوعياً بجُزَيء مستهدف، من قبيل بروتين ذي علاقة بالسرطان، أو جُزَيء من متفجر لدائني. وحينما يلتصق ذلك الجُزَيء بالصفيحة، تنحني ويتغير تردّد اهتزازها الذي يمكن قياسه بارتداد حزمة ليزرية من على سطحها. وفي الواقع، استكمل باحثون لدى مختبرات ORNL الوطنية (الأميركية)[2] صنع كاشف حسّاس محمول باليد، يمتص الهواء ويبحث فيه عن متفجرات متنوعة. ونظراً إلى أن تلك المُحِسَّات محفورة بالتقانة نفسها المستخدمة لصنع رقاقات

الحاسوب، فإن سعر الواحد منها يجب ألا يتجاوز بضع عشرات الدولارات. وبالمقارنة، تُعتبر الأجهزة الموجودة حالياً في المطارات والتي لها الحساسية نفسها، ومن أمثلتها مقياس الطيف الكبير الحجم، صعبة الحمل بسبب ثقلها، وعالية التكلفة، فسعر الواحد منها يصل إلى نحو 100000 دولار، ولا تستطيع شم جُزَيئات المتفجرات في الهواء. يمكن لهذه المُحِسَّات كشف البروتينات المقترنة بسرطان البروستات. وقد بُنيت صفيفات منها لكشف أعراض السرطانات الأخرى وأمراض القلب، وحتى الجينات المتحوِّرة.

وصُنعت أيضاً مقاييس تسارع على شكل نظم كهروميكانيكية ميكرويّة. ليس المصطلح **مقياس التسارع** مألوفاً لكثير من الناس، إلا أن هذه الآلة الضئيلة تؤدّي دوراً شديد الأهمية في كل مرة يجلس فيها شخص خلف مقود السيارة. يكشف مقياس التسارع تغيُّر الحركة، وعلى وجه الخصوص توقف السيارة المفاجئ في أثناء الاصطدام، فيقدح آلية نفخ وسادة الهواء الواقية.

يقوم مقياس التسارع على تقانتين، واحدة جديدة وأخرى موجودة. التقانة القديمة هي تقانة الدارات المتكاملة المستخدمة على نطاق واسع في صناعة أنصاف النواقل، والجديدة هي سخَّان ميكروي الحجم. يؤثّر التسارع في عملية الحمل الحراري في الغازات، مولّداً فوارق ضئيلة في درجات الحرارة على جانبي السخان الميكروي. وتكتشف المُحِسّات الموجودة على الرقاقة ذلك الفرق في درجة الحرارة.

يمكن استخدام مقاييس التسارع في كثير من التطبيقات، إلى جانب استخدامها في الوسائد الهوائية. على سبيل المثال، يمكن لمنظومة تحديد الموقع العالمية الفضائية (Global Positioning System (GPS)) التي تحدِّد إحداثيات المواقع على الأرض بدقة أن تعتمد على مقاييس التسارع لمتابعة تسارع واتجاه حركة السيارات والعربات الأخرى[3].

والغبار الذكي (Smart Dust) هو اسمٌ لشبكات المجِسَّات اللاسلكية التي تُسمى أيضاً بالهباء (Motes). تتألف كل حُبيْبة من هذا الهباء من رقاقة بحجم حبة الأرُز مهمتها كشف وتسجيل أشياء كالحرارة والحركة والموقع. اربط الحبة مع بطارية بحجم قرص الأسبرين، فتقوم بعملها مدة تزيد على السنة. أضف إليها منبع طاقة بحجم غطاء قارورة، فتعمل مدة تزيد على عشر سنوات. وأهم من ذلك، تحتوي حبات الهباء على مرسِلات راديوية ضئيلة تتصل بالحبات الأخرى (أو بمحطة ثابتة مرتبطة بحاسوب) ضمن مسافة تساوي نحو 100 قدم. وبوجود شبكة مكوّنة من 000 10 حبة، وهو الحد الأعلى، يمكنك تغطية 9 أميال مربعة، والحصول على معلومات عن كل نقطة فيها.

سوف تغيّر هذه الحبات الضئيلة الطريقة التي نراقب بها العالم. فقد أُجريت تجربة لمصلحة الجيش الأميركي أُلقي فيها 8 حبات فقط من طائرة لكشف أسطول من العربات على الأرض. وتخطط قوى الأمن الداخلي الأميركية للبدء باستخدامها في مشروع طليعي لحماية الموانئ في فلوريدا. وبدأت شركات باستخدامها في مخازن بيع الأغذية لجعل البرادات الكبيرة أعلى مردوداً من حيث استهلاك الطاقة.

## تصنيع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

### التشغيل بليزرات الأشعّة فوق البنفسجية

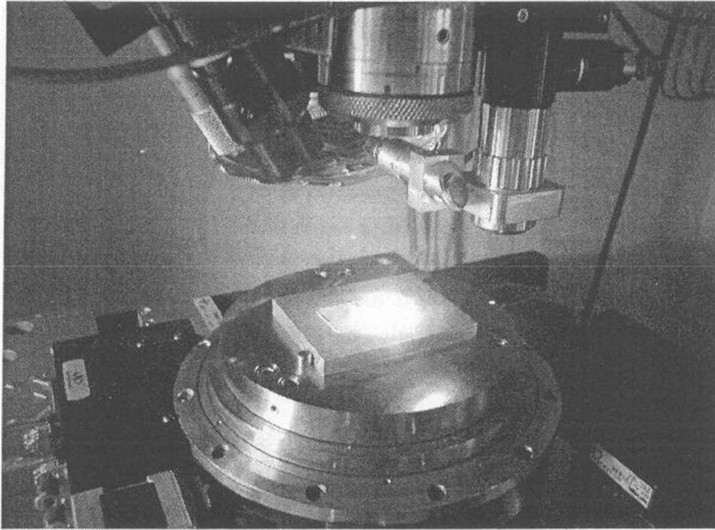
ظهر التشغيل الميكروي بليزر الأشعّة فوق البنفسجية للنظم الكهروميكانيكية والكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة كبديل عملي ومفضل على التشغيل المبلول وغيره من الطرائق، ويعود الفضل في

ذلك إلى سرعته ودقته وبساطته. ويمكن استخدامه في تطبيقات من قبيل فصل الشرائح السليكونية حيث لا يمكن استخدام التشغيل المبلول، وهو متفوق على القص الميكانيكي بسبب خلوّه من الاهتزاز. لكن أحد مصادر القلق الأساسية من استخدامه هو نوع منتجاته الثانوية ومخلفاته: طبيعتها ومفاعيلها وإجراءات التخلص منها. تختلف مقادير وأنواع مخلفات التشغيل الميكروي بليزر الأشعّة فوق البنفسجية (الحت الفوتوني) باختلاف المادة المشغَّلة، وثمة طرائق فاعلة لإزالة المخلّفات والتخلّص من آثارها تساعد على الاستخدام الناجح لهذا النوع من التشغيل.

النظم الكهروميكانيكية والكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة هي نتاج مكاملة لعناصر بصرية وميكانيكية ومُحِسَّات ومفعِّلات وإلكترونيات على ركيزة مشتركة (من السليكون على الأرجح) بواسطة تقانة التصنيع الميكروي. تُصنع الإلكترونيات باستخدام سيرورات صناعة الدارات المتكاملة، وتُصنع المكوّنات الميكانيكية الميكرويّة باستخدام سيرورات تشغيل ميكروي ملائمة تزيل انتقائياً أجزاء من الشراحة لتكوين التجهيزات الميكانيكية والكهروميكانيكية. وإحدى الطرائق الشائعة هي الحفر الكيميائي. ومن الطرائق الأخرى، الحفر بحزمة الشوارد والبلازما، والقولبة، والقص الميكانيكي. إلا أن التشغيل بليزر الأمواج فوق البنفسجية آخذ بالترسُّخ المتزايد بوصفه أفضل خيارات التشغيل الميكروي للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة (انظر الشكل 9 ـ 2).

تتطلَّب الحاجة المتزايدة إلى تشغيل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سماحيات فائقة الدقة، وقابلية للإنتاج المتكرر بالمواصفات بنفسها، إضافة إلى المعالجة المجدية اقتصادياً. لذا تُعتبر ليزرات الإكسايمر ذات الموجة القصيرة (157 ـ 248 نم)، وليزرات الحالة

الصلبة ذات الضخ بثنائيات الأشعّة فوق البنفسجية مثالية لهذه التطبيقات، خصوصاً في ما يتعلق بمعالجة المواد الصعبة، ومن أمثلتها زجاج البوروسليكات والكوارتز والسليكا المصهورة والياقوت الأزرق. فهذه الليزرات تتصف بالمقدرة على حفر أشكال معقّدة ذات مساحات كبيرة، وبإمكانات المعالجة الجماعية، وبالقَطْع الناعم المميَّز، وذلك في تطبيقات كفتح الثقوب الميكرويّة المقاس.



**الشكل 9 ـ 2: يمكّن ميّز** Resolution الموجة الشديدة القصر الخاص بليزر الأشعة فوق البنفسجية المبيَّن هنا من التشغيل الميكانيكي لتجهيزات إلكتروميكانيكية ميكروية صغيرة جداً[4].

ويتضمّن التشغيل الميكروي إنشاء أشكال معقّدة وفتح ثقوب وتكوين مخاريط وقنوات وحجرات ميكرويّة المقاس، لجميعها مقاسات متجانسة ومتناسقة، إضافةً إلى مواصفات أساسية معيّنة. ومن تلك المواصفات أشكال محدّدة بدقة، وجدران ناعمة،

وسطوح نظيفة بصرياً، وكل ذلك يجب أن يتحقّق في الإنتاج المتكرر وبسرعات كافية لجعل إنتاجها مجدياً اقتصادياً. مقارنةً بالتشغيل الميكروي الليزري، يتطلب الحفر الكيميائي عدداً أكبر من خطوات المعالجة، ويشكل مصدراً للقلق البيئي بسبب المواد الكيميائية المستخدمة، إضافة إلى مشاكل قابلية المواد للتشغيل.

في التشغيل الميكروي الليزري، تمتص المواد المختلفة الطاقة الليزرية بمعدّلات مختلفة. وكلما كان امتصاص المادة أشدّ، كان التشغيل أسهل وأنظف وأدق. يمكن تشغيل كثير من المواد بكفاءة باستخدام ليزرات ذات موجة طويلة (كليزر النيوديميوم: ياغ (YAG)). إلا أن كثيراً من المواد أيضاً، ومنها بعض أنواع الزجاج والياقوت الأزرق، لا يستطيع تحمُّل الأمواج الطويلة من دون أن تتصدّع أو تنصهر أو تتشظى. وتتكوَّن في بعض المواد ثقوب خشنة (تحصل جزئياً بسبب الميْز المنخفض) وحواف لا تحقّق تماماً متطلبات التطبيق. يمكن معالجة المواد الصعبة، كالكوارتز والسليكا المصهورة، بكفاءة باستخدام ليزر أمواج فوق بنفسجية (157 نم). فبسبب امتصاص المادة الشديد لأشعّة الليزر القصيرة الموجة، فإن تشغيلها ميكروياً يكون نظيفاً ودقيقاً وقابلاً للتكرار بالمواصفات نفسها. تحتوي ليزرات الأشعّة فوق البنفسجية على منابع ليزر ذات قدرات بين العالية والمتوسطة، وتعمل بأطوال موجات قابلة للتوليف تقع بين 157 و351 نم. وهذا يُمكِّن من استمثال السيرورة تبعاً للامتصاص. ويمكن إزالة طبقات من المادة بسماكات تقل عن الميكرومتر بكل نبضة ليزرية. ويمكن إسقاط أشعّة الليزر فوق البنفسجية على المادة بميز عالٍ جداً. حتى باستخدام عدسات بسيطة لتشكيل وتوجيه الحزمة، يمكن تحقيق ميْز ميكروي بسهولة.

## الحت الضوئي

تُعتبر طريقة إزالة المادة من الشراحة بليزر الأشعّة فوق البنفسجية فريدة، وهي تابع مباشر لخصائص الليزر ونوع طاقته. يحصل الحتّ الضوئي (Photo Ablation) عندما يَمتص جزء صغير من المادة طاقة ليزرية ذات قدرة ذروة عالية. فحين تعريض المادة إلى نبضات ليزر فوق بنفسجي مبأَّرة فيها، تمتص طبقة رقيقة منها، سماكتها تقل عادة عن 0.1 ميكرون، نبضة الطاقة، وذلك بسبب قصر طول موجة الضوء فوق البنفسجي البعيد. ويؤدّي امتصاص نبضة ضوء الليزر ذات القدرة اللحظية العالية إلى تحطيم شديد للروابط بين ذرّات المادة. وتنتشر الشظايا الجُزَيئية الناتجة على شكل أسطوانة بلازمية تحمل الطاقة الحرارية بعيداً عن القطعة التي يجري تشغيلها. لذا يحصل أذى قليل، أو لا يحصل أي أذى، للمادة المحيطة بالشكل الذي يجري تكوينه. وتنتزع كل نبضة ليزرية طبقة رقيقة بسماكة تقل عن الميكرون، وتحمل المادة المنزوعة الحرارة معها بعيداً. أما العمق فيتحقّق بتكرار القذف الليزري المتحكَّم به وفق الجرعة اللازمة.

وبوجود مواد كثيرة، خصوصاً المواد الطرية التي هي من قبيل البوليمرات، تتبخر تقريباً النواتج الثانوية للحت وتُحمل بعيداً ضمن أسطوانة البلازما، ولا يبقى إلا جزء ضئيل من المادة المحتوتة (بقايا الكربون) على القطعة المشغلة. وهذا صحيح على وجه الخصوص في عمليات التشغيل الميكروي الخفيف. لكن في عمليات التثقيب وتكوين الأشكال المعقّدة، حيث يُزال مقدار كبير من المادة، وإذا كانت المادة قاسية (كالسليكا المصهورة والياقوت الأزرق)، فإنه سوف يكون ثمة مقدار كبير من الرواسب المتبقّية. إلا أن هذه الرواسب أشدّ نعومةً وأقل مقداراً، على سبيل المثال، من النواتج

الثانوية الخشنة الناجمة عن القص بمنشار الألماس والخدش الميكانيكي.

ونظراً إلى الأحجام الصغيرة للأجزاء المتحركة، وإلى السماحيات الدقيقة في ما بينها في النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، فإن تلك النظم شديدة الحساسية لأي نوع من التلوث بالجُسيْمات، الذي ينجم عن عمليات التشغيل الميكروي غير الحفر الكيميائي. صحيحٌ أن أسطوانة الشظايا من دون الميكرويّة المقذوفة الناجمة عن الحتّ الليزري لا تمثل في الأغلب مصدر قلق كبير، إلا أن الحكمة تقتضي التخلّص منها كي لا تؤثّر في عمل ووثوقية الآلة الميكرويّة. وإزالة هذا الغبار يمثّل مشكلة أحياناً. فبعض النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة لا يستطيع الخضوع إلى سيرورة مبلولة، ولذا يكون الشطف أو الغسيل بالماء مستحيلاً. لكن يمكن للإزالة بالتخلية والتنفيض أن تكون فاعلة حين استخدامها بعناية مع فرشاة أو سكين هوائية، لكن يجب الانتباه إلى عدم نفخ الغبار على تجهيزات أخرى، أو على مناطق لا يمكن تنظيفها ويمكن أن تسبب مشكلات وثوقية.

### تقنية الغشاء الواقي

من أجل تطبيقات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة التي يمكن استخدام الماء فيها، جرى تطوير تقنية حماية بغشاء قابل للانحلال بالماء، يُغطي التجهيزة قبل بدء التشغيل الميكروي. يأسر هذا الغشاء المخلّفات المتبقّية الصغيرة، فتزول معه حين غسله بعد انتهاء التشغيل. لقد استُقصيت طرائق يمكن بواسطتها تطبيق هذا الغطاء الواقي على نحو فاعل في بيئة الإنتاج الكمي، إلا أن صغر حجم أجزاء النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة وأعدادها الكبيرة مثّلت مصاعب إضافية في تلك السيرورة.

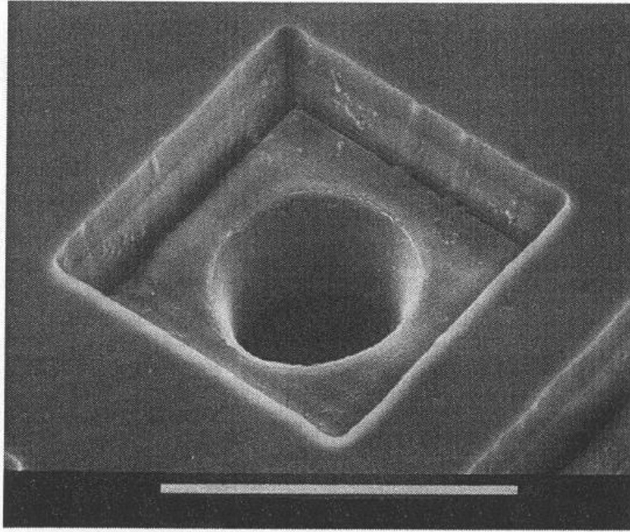
يُنفَّذ التشغيل الميكروي بليزر الأشعّة فوق البنفسجية باستخدام ليزرات الحالة الصلبة القصيرة الموجة ذات الضخ بالثنائيات، التي تعطي نبضات قصيرة عرض كل منها أصغر من المتوافر عادة، وهذا يسمح باستخدام جميع الأطوال الموجية الليزرية فوق البنفسجية، ومن ضمنها الأطوال 157 و193 و248 نم.

هناك عدد من المزايا لهذه الطريقة مقارنةً بالمعالجة المبلولة. فليس ثمة استخدام لمواد كيميائية، إضافة إلى أن عدد خطوات المعالجة أصغر. وتُزال المادة في سيرورة وحيدة الخطوة، وهي سيرورة أسرع من الحفر البلازمي. ويمكِّن التشغيل الليزري الميكروي من تكوين أشكال ثلاثية الأبعاد في خطوة واحدة من خلال التحكُّم بتسليط الليزر. يُضاف إلى ذلك أن الليزر يُعطي زاوية تدرّج صغيرة تُلغي مشكلة القص غير التام المقترن عادة بالمعالجة المبلولة.

وكلما كان طول الموجة أقصر، في المعالجة بليزر الأشعّة فوق البنفسجية، كان امتصاص المادة للطاقة أفضل (انظر الشكل 9 ـ 3). وهذا يسمح للمشغِّل بإزالة طبقات من المادة رقيقة جداً مسيطر عليها بكل نبضة ليزر. إن ليزر الأشعّة فوق البنفسجية هو ليزر عالي القدرة يمكن أن يُعطي نبضات بمعدّلات تقع بين مئات الهرتز والألف هرتز. وهذا ما يُعطي المشغِّل تحكّماً دقيقاً بالعمق بناءً على امتصاص المادة لطاقة الليزر، لأن معظم المواد تكون أفضل امتصاصاً في مجال الموجات فوق البنفسجية. يُضاف إلى ذلك أنه كلما كانت الأمواج أقصر، أمكن الحصول على ميْز أنعم. إن المقدرة على التبئير في بقع صغيرة تمثِّل عاملاً حاسماً في المقدرة على التشغيل الميكروي للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة.

عملياً، تُحفَر جميع مواد أنصاف النواقل، وهي السليكون وزرنيخ الغاليوم ونيتريد الغاليوم والياقوت الأزرق والزجاج وكامل

طيف السيراميكات والبوليمرات (المستخدمة في السوائليات الميكرويّة)، بليزر الأشعّة فوق البنفسجية. وحين حفر مادة الركيزة بنبضات ذلك الليزر، لا تذهب المادة بعيداً بالضرورة، سواء تبخّرت أم تحوّلت إلى جُسيْمات منفصلة من دون ميكرويّة. لذا، وإذا كانت مسحوقاً ناعماً (بخاصة في حالة مواد أنصاف النواقل أو السيراميكات)، فإنها يمكن أن تعود لتترسب على سطح الركيزة.



**الشكل 9 ـ 3: يمكن للتحكُّم بالتعريض إلى أشعة الليزر أن يولِّد أشكالا ثلاثية الأبعاد لتطبيقات النظم الإلكتروميكانيكية والإلكتروميكيانيكية البصرية الميكروية. لقد شُغِّل شكل فوهة نفث الحبر، المبين في صورة مجهر المسح الإلكتروني، باستخدام تقانة ليزر الأشعة فوق البنفسجية الشديدة القصر(4).**

## البقايا

حينما تكون نبضة الليزر أطول، تمتص أسطوانة البلازما المتشكلة المادة المُزالة في بداية النبضة وعند نهايتها، لأن التسخين

الفائق يبعثر المادة. وحينما تكون النبضة أقصر، يكون التبعثر أقل، وتُقذف تلك المادة بعيداً بعملية الحتّ بسرعة تفوق سرعة الصوت، حاملة معها الحرارة الناجمة عن التسخين الليزري. وهذا يسمح بتشغيل الآلة الميكرويّة عملياً من دون تسخين، أي إن التأثير الحراري في المادة المجاورة أو البنية الميكرويّة يكون ضئيلاً أو معدوماً.

وتعتمد أحجام جُسيْمات الشظايا على المادة التي في قيد التشغيل. في حالة البوليمرات، يمكن لأحجام الشظايا أن تصل بصغرها حتى المستوى الجُزَيئي، حيث تتألف من بوليمرات متكسرة ومركَّبات مختلفة وغازات. أما في حالة الأجسام الصلبة، ومنها الـ $SiO_2$ وSi والسيراميكات، فيمكن لسحابة الشظايا أن تتألف من المعادن المكوّنة للمادة وأكاسيدها على شكل جُسيْمات من دون ميكرويّة ناعمة. تمثّل هذه الجُسيْمات مصدراً للقلق بسبب إمكان عودتها إلى الترسب فوق المادة. ويمكن للشظايا أن تغطي منطقة تمتد من عشرات حتى مئات الميكرونات، تبعاً لكمية المادة المزالة. وعادةً، تكون التجهيزات المجاورة ضمن ذلك المجال، خصوصاً عند إجراء عملية قص الشريحة التي تمثّل تكوين التجهيزة نفسها.

### طرائق إزالة الحطام

يمكن إزالة الحطام المتخلف عن التشغيل الميكروي الليزري بتقنيات وطرائق مختلفة. وإحدى تلك الطرائق (حيث تكون المعالجة المبتلة أو التماس مع الماء ممكنين) هي استخدام سائل مساعد مع الليزر يشطف الحطام والشظايا. وفي حالة استخدام ليزر الأشعّة فوق البنفسجية، يمكن لتيار سائل أو لضباب خفيف موجّه نحو المنطقة التي يجري حفرها أن يحمل المخلّفات بعيداً، لكن عيب هذه الطريقة هو الحاجة إلى زيادة عدد نبضات الليزر اللازمة لحفر القطعة. واستخدام «ثلج» الـ $CO_2$ هو طريقة أخرى لجمع جُسيْمات الحطام.

لكن الطريقة المثلى لإزالة المخلّفات هي استخدام طبقة، أو طلاء، ذوَّابين، يخترقهما الليزر لحفر القطعة. وتترسب الشظايا على الغشاء الذي يُغسل معها بعد انتهاء التشغيل. ثمة طيف واسع من الطلاءات التي يمكن استخدامها، على أن تكون طبعاً متوافقة مع النتيجة النهائية المبتغاة.

والطريقة الأخرى هي إجراء التشغيل في الخلاء حيث يزداد طول المسار الوسطي الحر الذي يمكن للبلازما أن تسلكه. وهذا يتيح للحطام مخرجاً سهلاً من منطقة الحتّ (بسبب العدد الصغير لجُزَيئات الهواء أو الغاز التي يحصل التصادم معها). لكن المعالجة في الخلاء معقّدة وغير عملية لمعظم مرافق وحالات الإنتاج، تقنياً ومالياً.

عندما يكون استخدام السائل المساعد غير ممكن، فإن أكثر طرائق إزالة الحطام شيوعاً هي نفث الغاز مع فوهة تخلية تولِّد مفعول فنتوري (Venturi Effect) الذي يسحب الحطام من مجال التشظي. يُدخَل غاز التنظيف في منطقة الحتّ حيث تولِّد التخلية منطقة منخفضة الضغط، تعمل كعادم يشفط الحطام من السطح ويحمله بعيداً عبر فوهة التخلية. يمكن استخدام كثير من أنواع غازات التنظيف، إلا أن أكثرها شيوعاً في حالة ليزرات الأشعّة فوق البنفسجية هي الغازات الخاملة كالنيتروجين والأرغون والهيليوم. أما الغازات النشطة كالهواء والأُكسجين، فلا تُستخدم. يتميز الهيليوم بكمون تشرّد مرتفع جداً، وهذا يؤدّي إلى مسار حر وسطي طويل جداً للشظايا المقذوفة بسبب صغر وخفة ذرّاته، وخاصية كبت تشكل البلازما منه. لذا فإن تياراً عالي الضغط من الهيليوم يقلل مقدار الحطام المترسّب على السطح في المنطقة المجاورة مباشرة للمنطقة التي يجري حتها. لكن عيب تيار الغاز هو أنه يمكن أن يؤثّر تأثيراً سيئاً في حزمة الليزر في حالة التصوير الدقيق الميْز. لذا يجب

التحكّم بتدفّق الغاز بدقة كبيرة، وإلا فإن الحزمة الليزرية سوف تتشوّه. ويزيد الهيليوم من معدّل الحفر بليزر الأشعّة فوق البنفسجية، وقد يكون ذلك بسبب تقلّص حجم البلازما في أسطوانة الحطام المقذوف، لأن البلازما تمتص طاقة الحزمة الليزرية.

وكلما كانت المنطقة التي يجري حفرها أكبر، نتج حطام أكثر. لذا يجب التحكُّم بعملية إزالة الحطام بحيث لا تتداخل مع عملية الحتّ أو تترك رواسب، وتكون متوافقة مع معدّل توليد مخلّفات الحتّ.

إن الحتّ الضوئي بليزر الأشعّة فوق البنفسجية قابل للتطبيق العملي، وهو يوفّر كثيراً من المزايا مقارنةً بتقنيات التشغيل الميكروي الأخرى للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. لكنْ، تبعاً للمادة التي يجري تشغيلها ولمقدار التشغيل، فإن هذه السيرورة تولّد مخلفات تجب إزالتها لدرء عودتها إلى التوضُّع على الركيزة أو على الأجزاء المجاورة. إلا أن تقانات إزالة المخلّفات الفاعلة المتوافرة تسمح للمستخدِم باستغلال قوة المعالجة بليزرات الأشعّة فوق البنفسجية لمواجهة التحديات اللامحدودة التي تواجه دفع تقانة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة إلى الأمام.

### التوضيع الكيميائي للأبخرة المحسَّن بالبلازما

هناك كثير من التقنيات الملائمة لترسيب الطلاءات التزليقية على عناصر الآلات العادية، إلا أن طبيعة عناصر النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الصغيرة تمثّل مشكلة معقّدة للذين يقومون بأعمال الطلاء. فالتعامل مع الأجزاء كلٌّ على حدة ليس عملياً، وتطبيق الطلاءات بتقنيات مثل اللصق الراتنجي أو الصقل (Burnishing) ليس ممكناً. وتوضيع البخار فيزيائياً هو سيرورة خط نظر، وهذا ما يجعل ترسيب

المادة على الجدران الجانبية صعباً. أما استخدام التوضيع الكيميائي للأبخرة لإجراء طلي تزليقي بمادة من قبيل الألماس، برغم كونه ممكناً، فإنه يتطلب درجات حرارة عالية يمكن أن تغيّر البنية الميكرويّة للمادة التي يجري طليها.

لتجاوز هذه المشاكل، جرى أخيراً تطوير طريقة طلي جديدة لدى مختبرات سانديا الوطنية[5]. حيث طُبِّق الطلاء بتقنية التوضيع الكيميائي للأبخرة المحسَّن بالبلازما الذي تُرسَّب فيه مواد متشرّدة على ركائز على نحو تبقى فيه درجة حرارة الركيزة تحت 150 مْ. يُضاف إلى ذلك أنه بدلاً من طلاء الأجزاء إفرادياً، تُطلى الشراحة برمتها قبل تحرير أجزائها، لكن بعد التلبيس الكهربائي والتنعيم وتفكيك مادة القالب.

ثمة سيرورة تسمّى ليغا (LIGA)، وهي سيرورة تشغيل ميكروي تُصنع فيها العناصر الميكانيكية إفرادياً بترسيب المادة في قوالب مشكَّلة بالطباعة الضوئية، تتبعه عملية تجميع الأجزاء الميكرويّة في تجهيزة كهروميكانيكية ميكرويّة. أتى الاسم ليغا (LIGA) من العبارة الألمانية Lithographie, Galvanoformung, und Abformung التي تعني «طباعة ضوئية، تلبيس كهربائي، وقولبة». أما الخطوات التي تتضمّنها السيرورة ليغا عادة فهي:

- تعريض
- تظهير
- طلي كهربائي
- تنعيم
- تحرير

الخطوة الأولى هي تكوين قالب ميكروي بالطباعة الضوئية بالأشعّة السينية البعيدة التي يولّدها مسرِّع إلكترونات تزامني (synchrotron). **أولاً**، يُحضَّر قناع أشعّة سينية ذو توزع للأجزاء ثنائي الأبعاد. تتألف الأقنعة عادة من البيريليوم أو السليكون أو الكربون، أو من أغشية رقيقة من الألماس أو كربيد السليكون أو الـ $Si_3N_4$ (تبعاً لمنبع الأشعّة السينية وللأشكال التي يمثّلها القناع)، وتُوضَّع على تلك الأقنعة طبقات أشكال من التنغستين أو الذهب تعمل ماصات للأشعّة السينية. حالياً، البولي ميثيل ميثاكريلات (Polymethylmethacrylate) هي المادة المفضلة للتبلمر الضوئي بالأشعّة السينية. تُلصق هذه المادة بركيزة مُمعدَنة من السليكون أو الزجاج إما بالبلمرة المباشرة للميثيل ميثاكريلات أو بلصق صفيحة من تلك المادة بمونومر الميثيل ميثاكريلات. وتُزال مناطق البولي ميثيل ميثاكريلات التي تتعرّض للأشعّة السينية بمُظهِر مناسب لتكوين قالب ميكروي دقيق.

يجب أن تحتوي قاعدة القالب على قاعدة تلبيس (طبقة ناقلة كهربائياً) مناسبة للتلبيس الكهربائي. وأحد الأمثلة الشائعة لقاعدة من هذا النوع هو غشاء من الـ Ti/Cu/Ti أو Ti/Au/Ti، تحقِّق فيه طبقة التيتانيوم السفلى الالتصاق بالركيزة، وتحقِّق الطبقة العليا التصاق المتبلمر بالضوء، وتحمي أيضاً طبقة التلبيس الكهربائي المكوّنة من الذهب أو النحاس. وتُزال طبقة التيتانيوم العليا بعد تظهير المتبلمر بالضوء، لكن قبل التلبيس الكهربائي.

تُعرَّض طبقات البولي ميثيل ميثاكريلات للأشعّة السينية الصادرة عن مسرّع الإلكترونات التزامني الشديد التوجيه، فتتكوَّن جدران قالب مستوية، ذات نسب بُعدية كبيرة، جميعها متعامد مع قاعدة التلبيس (تعريض للأشعّة بزاوية ناظمية). لكن ثمة تقنيات عدّة أخرى

في قيد الاستقصاء لصنع قوالب ميكرويّة من دون استخدام مسرّع الإلكترونات التزامني، ومنها الأشعّة فوق البنفسجية، والحفر التفاعلي الشاردي العميق، والحت الليزري.

يُملأ القالب بالترسيب الكهربائي العادي. عملياً، يمكن صنع الأجزاء من أي مادة يمكن أن تتشكَّل كهربائياً عند إجهاد منخفض، إلا أن النيكل وخلائطه (نيكل ـ كوبالت، نيكل ـ حديد) هي أكثر المواد استخداماً، مع أنه يمكن استخدام مجموعة من المواد أكبر كثيراً، منها النحاس والذهب والفضة، لصنع أجزاء ليغا ملبَّسة كهربائياً.

بإضافة جُسيْمات من مواد مختلفة، مثل المزلقات الصلبة أو الجُسيْمات القاسية، إلى حوض التلبيس، يمكن صنع مكوِّنات ذاتية التزليق، أو مقواة بالجُسيْمات. أو يمكن صنع قالب ميكروي للقطعة النهائية. بعدئذٍ يمكن ملء هذا القالب المعدني بسيراميك أو بوليمر أو مادة مركَّبة بوليمرية، وهذا ما يؤدّي إلى مزيد من توسيع مجموعة المواد التي تُصنع منها النظم الميكرويّة.

تُصنَع بتقانة ليغا الحالية عناصر إفرادية تُجمَّع بعدئذٍ في نظم ميكرويّة عاملة أكبر حجماً. ويجري حالياً تطوير طريقة الربط التغلغلي في الخلاء لصنع بُنى ليغا متعدّدة الطبقات أشدّ تعقيداً. وثمة تقنيات قيد التطوير أيضاً لدى مختبرات سانديا الوطنية[5] لتجميع الأجزاء في نُظم كهروميكانيكية ميكرويّة باستخدام الروبوتات. ومن الممكن أن تُصنع نظم ليغا المستقبلية الميكرويّة بواسطة الطبقات الذوابة والربط التغلغلي لإلغاء الحاجة إلى التجميع من حيث المبدأ، بإنتاج تجهيزة تامة التكامل.

إن إحدى أكثر تقانات التلبيس كفاءة هي التوضيع الكيميائي

للأبخرة المحسَّن بالبلازما، الذي تتشكَّل فيه البلازما من مادة السيلوكزان (Siloxane) الأولية. لقد استُخدمت هذه التقنية لترسيب مادة مركَّبة نانوية شبيهة بالألماس، سماكتها 100 نم على أجزاء ليغا مصنوعة من النيكل. يحتوي الغشاء المرسَّب على شبكة من الكربون والهيدروجين شبيهة بالألماس، وعلى شبكة أخرى من السليكون والأُكسجين، مع ترابط أصغري بين الشبكتين. ويُدَّعى أن هذه البنية تحتوي على إجهادات داخلية أقل كثيراً من تلك التي في الكربون الشبيه بالألماس، وهذا ما يعطي التصاقاً جيداً مع معظم الركائز من دون طبقات بينية.

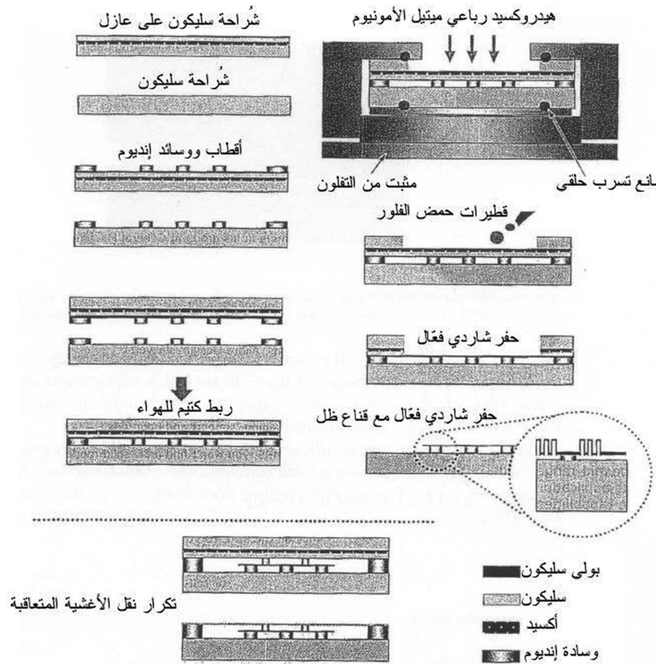
من حيث المبدأ، يمكن تطبيق الإجرائية المذكورة آنفاً لترسيب أي طلاء تزليقي. صحيحٌ أن تصنيع النظم في تقانة ليغا الحالية يتطلب بعض التجميع، إلا أن مزيتها هي الطيف الواسع من المواد المتاحة التي يمكن الاختيار منها، إضافة إلى أن وصول الطلاءات إلى السطوح فيها سهل جداً. وبتعديل مناسب لسيرورات الطلاء الشائعة، يمكن استقصاء مزيد من الطلاءات التزليقية العادية (طلاءات صلبة ومزلقات) أو معالجة سطوح (كربنة ونتردة وزرع شاردي) لتخفيف الاحتكاك والاهتراء.

## سيرورة نقل الغشاء في مستوى الشُراحة

ثمة سيرورة مبتكرة لنقل بنية سليكونية مشغّلة ميكروياً برمتها في مستوى الشراحة لمزاوجتها أو ربطها مع بنية مشابهة أخرى. والقصد من هذه السيرورة، في المقام الأول، هو المكاملة في مستوى الشراحة للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة المصنوعة على ركائز غير متماثلة.

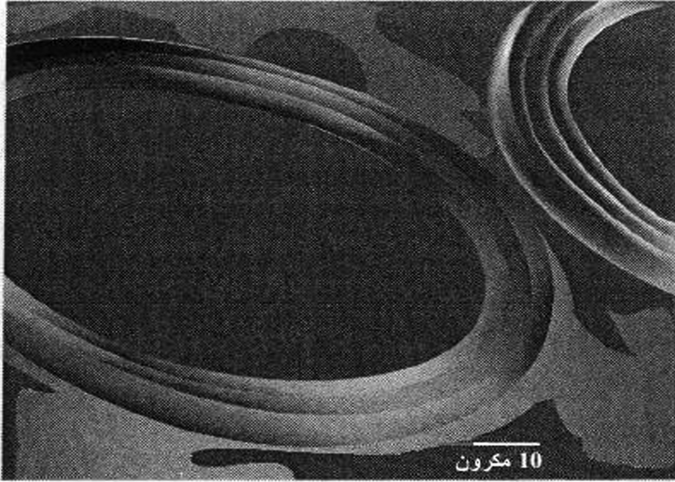
وخلافاً لسيرورات نقل الغشاء القديمة، لا يوجد هنا استخدام

للشمع أو الإيبوكسي في أثناء النقل. في هذه السيرورة، تعمل ركيزة الغشاء، الذي سوف يُنقل في مستوى الشراحة، كحامل يُحفَر بعد اكتمال النقل. إن الخاصية المهمة لهذه السيرورة هي أنه يمكن مكاملة بنيتين في مستوى الشراحة معاً من خلال الربط بوسائد من الإنديوم. وهذا مفيد من حيث أن السيرورة تولِّد إجهادات أقل (مقارنةً بتقنيات الربط الأخرى) في أثناء ربط بُنى شُكِّلت على ركائز غير متماثلة. أكثر من ذلك، وخلافاً لما هو في بعض سيرورات نقل الغشاء القديمة، لا يوجد هنا تحرير عَرضي لحمض الفلور من البنية النهائية، وهذه ميزة تنجم عن استخدام الإنديوم أو الألمنيوم أو أي معدن ربط طري آخر.




**الشكل 9 ـ 4: الخطوات الأساسية في سيرورة نقل الغشاء في مستوى الشُراحة.**

عُرضت هذه السيرورة[6] في وصل غشاء متموّج من السليكون المتعدّد البلّورات، كان قد صُنع بالتشكيل والحفر على شراحة مكوَّنة من سليكون على عازل، مع ركيزة سليكونية. يُشكِّل الغشاء المنقول مع الأقطاب التي يتوضع عليها صفيفةَ مفعِّلات كهروساكنة. وقد استُخدمت شراحة السليكون على العازل حاملاً، واستُخدمت شراحة سليكون أخرى أقطاباً (انظر الشكل 9 ـ 4). وبعد الأكسدة، وُضعت الأشكال على الشراحتين اللتين حُفِرتا لتشكيل البنية المتجعدة وصفيفة الأقطاب. ورُسِّبت طبقة السليكون المتعدّد البلّورات على شراحة السليكون الذي على العازل. ورُبطت شراحة الحامل بشراحة الأقطاب باستخدام وسائد مرسَّبة من بخار الإنديوم. لقد صُنعت، بتقنية النقل هذه، مفعِّلات كهروساكنة بفجوات مختلفة بين الأقطاب، حيث كانت الفجوات بين الغشاء المنقول وركيزة الأقطاب شديدة التجانس. ويبيِّن الشكل 9 ـ 5 المُنتج النهائي.




**الشكل 9 ـ 5: غشاء موجي الشكل من البولي سليكون سماكته تساوي 1 ميكرون فقط، نُقل إلى ركيزة سليكون لتكوين صفيفة من المفعِّلات الكهروساكنة. وقد عملت المفعِّلات وفقاً للمطلوب منها.**

### الآلات الميكرويّة

يقوم الباحثون لدى مختبرات سانديا الوطنية[5] ببناء آلات ميكرويّة من الألماس غير المتبلور، وهو ثاني أقسى مادة بعد الألماس المتبلور. سوف تجعل هذه المادة الآلات الميكرويّة أفضل مقاومة للاهتراء، وسوف تقلّص الاحتكاك الالتصاقي (Stiction). يُضاف إلى ذلك أن آلات الألماس غير المتبلور الميكرويّة متوافقة حيوياً ويمكن زرعها في جسم الإنسان، وأن التجهيزات المطلية بالألماس تعيش عمراً أطول بعشرة آلاف مرة من عمر السليكون المتعدّد البلّورات الذي يمثّل المادة المختارة اليوم للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. إن مختبرات سانديا تستطيع صنع نظم كهروميكانيكية ميكرويّة ألماسية باستخدام التوضيع بالليزر في نحو 3 ساعات، في حين أن عملية التطرية لإزالة الإجهادات الداخلية لا تستغرق سوى بضع دقائق.

## صنع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

تفوق إمكانات تصنيع التجهيزات الكهروميكانيكية الميكرويّة اليوم عدد التجهيزات التي يجري تصنيعها. والشركات التي دخلت أخيراً صناعة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة هي شركات نقلت معداتها من صناعة أنصاف النواقل إلى صناعة لا تحتاج إلى معدّات تصنيع جديدة. لا تحتاج صناعة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة إلى بناء مرافق أو شراء تجهيزات تصنيع جديدة لأن نسبة المستخدَم من تلك الموجودة حالياً لا يزيد على 10 في المئة.

تُصنّف شركات تصنيع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة غالباً وفقاً لسيرورة التصنيع التي تستخدمها. فبعضها متخصّص بالتشغيل

الميكروي السطحي الذي يستخدم الطباعة الضوئية المنتشرة في صناعة رقاقات أنصاف النواقل، وبعضها الآخر يستخدم التشغيل الميكروي الذي يتضمّن حفر الشراحة. وتُنتِج شركات أخرى الأجزاء المعدنية[7].

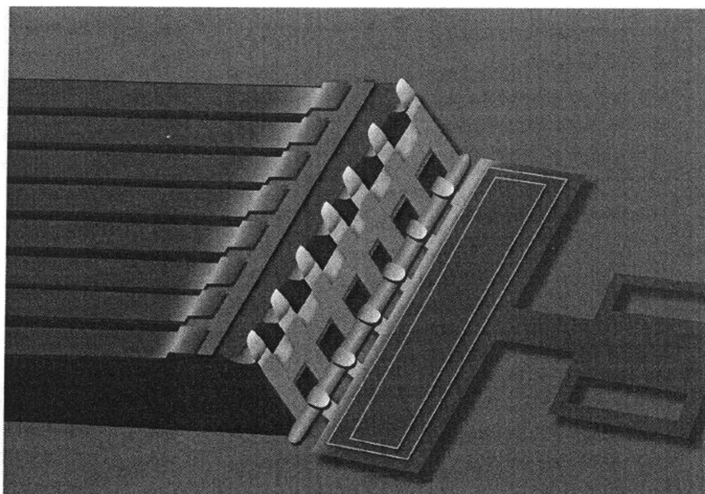
## تطبيقات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

ليست أكثر تطبيقات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة إثارة وإبداعاً تلك الآتية من الصناعة، بل تلك الآتية من الجامعات والهيئات الحكومية ومختبرات البحث الخاصة. لقد كانت وكالة الفضاء الأميركية سبَّاقة في تطوير تقانة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة للمهمات التي تتطلب تكاليف قليلة، وأحجاماً صغيرة، وأوزاناً خفيفة، واستهلاكاً أقل للطاقة. وتطوير التقانة النانوية جار في عدد من مراكز ناسا، ومنها مختبر التجهيزات الميكرويّة التابع لمركز تقانة الإلكترونيات الميكرويّة الفضائية في مختبر ناسا للدفع النفاث في باسادينا بكاليفورنيا. يهتم هذا المركز بالمُحِسَّات والإلكترونيات، وبالتقانتين البيئية والحيوية الطبية، وبتجهيزات الحوسبة المتقدمة، التي جميعها يستخدم تجهيزات ميكرويّة ونانوية المقاس. وتقوم مراكز بحث أخرى تابعة لناسا بتطوير وتسويق نظم ميكرويّة منها مُحِسَّات ضغط تعمل عند درجات الحرارة العالية، ومُحِسَّات كيميائية ونظم كهروميكانيكية ميكرويّة حيوية وتجهيزات ميكرويّة مصنوعة من كربيد السليكون.

يكمن مستقبل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في تطبيقاتها، وفق قول ألبرت سويكِّي (Albert Swiecki) من شركة Intellisense المتفرعة عن شركة Corning[8].

عَرَضَ الباحثان جفري زابينسكي (Jeffrey Zabinski) وجوزيف

ملتسر (Joseph Meltzer)، من مختبر بحوث القوى الجوية الأميركية[9]، اللذان يعملان أيضاً مع جامعة معهد بحوث دايتون، بنجاح، المنظومة $Fomblin^{R}$ Z-DOL 2000، وهي مادة تزليق ذات طورين، مقيَّد ومتحرك، في محرّك ضئيل عرضاني الحركة يعمل بالكهرباء الساكنة (انظر الشكل 9 ـ 6). وقد اختارا هذا المحرّك لاختبار المزلّق بسبب مساحة أقطابه الكبيرة التي تحقّق مستوى كافٍ من القوة، ولأنه يحتوي على عدد من ملتقيات التماس المختلفة المفيدة للدراسات التزليقية ولضمان ملاءمة منظومة التزليق للتطبيق. ويوفّر ذلك المحرّك أيضاً منصة لعدد من التجارب المهمة. واختارا المنظومة $Fomblin^{R}$ Z-DOL 2000 لأنها تحقّق الامتزاج الصحيح للطورين المقيَّد والمتنقل بعد المعالجة الحرارية، وقد ثبت نجاحها فعلاً كمزلق لسوّاقة القرص الصلب في الحاسوب.



**الشكل 9 ـ 6: محرك ميكروي عرضاني الحركة يعمل بالكهرباء الساكنة استُخدم لفحص المزلقات ذات الطورين، المقيّد والمتحرك.**

تهترئ المزلقات ذات الطبقة الوحيدة المقيّدة بسرعة عادةً. وقد بيَّن فريق البحث أن إضافة طَور متحرّك إلى المزلِّق تجعله قادراً على الالتئام الذاتي، وأن المنظومة الجديدة قد تكون مفتاح بناء نظم كهروميكانيكية ميكرويّة أفضل أداءً وأطول عمراً.

يرى المراقبون في الصناعة أن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سوف تكون بالنسبة إلى المكوِّنات الميكانيكية كالدارات المتكاملة بالنسبة إلى الإلكترونيات. وبعض النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، من قبيل تلك التي يمكن أن تُستخدم في المجال الطبي الحيوي (كالأعضاء الاصطناعية)، وفي نظم الدفاع (كالمحِسَّات التي تكشف الأسلحة الكيميائية والجرثومية)، والمنتجات الاستهلاكية المحمولة (وحدات تغذية الحواسيب المحمولة مثلاً)، يتطلب مكوِّنات معدنية ثلاثية الأبعاد. وهنا يأتي دور النيكل في النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة.

يوفِّر النيكل المرسَّب كهربائياً على المكوِّنات الثلاثية الأبعاد الأمان الإنشائي. وفي الواقع، يمكن النظر إلى الترسيب الكهربائي الميكروي على أنه مكافئ في المستوى الصغري للصبّ واللحام المستخدمين في صنع الإنشاءات الميكانيكية الكبيرة، وفق قول جورج وايتسايدس (George Whitesides)، أستاذ الكيمياء في جامعة هارفارد[(10)]. يقول وايتسايدس: «إن مقدار النيكل الذي يُستخدم ضئيل فعلاً، لكن الفائدة التي يحققها كبيرة جداً».

يقوم وايتسايدس باختبار النيكل لاستخدامه في بُنى معدنية مختلفة ثلاثية الأبعاد، منها المبادلات الحرارية والمكوّنات الخاصة بالطائرات الصغيرة. ويزاوج فريق عمله بين الترسيب الكهربائي والطباعة الضوئية المستخدمة لنقل أشكال الدارات إلى الركيزة، وذلك لبناء هياكل ميكرويّة.

يقول وايتسايدس أيضاً: «إن سبب استعمال النيكل هو أنه يستجيب للكيمياء الكهربائية، ويتصف بخواص ميكانيكية ومقاومة تآكل جيدة، إضافة إلى أنه رخيص الثمن. وهو قوي ورخيص وسهل المعالجة في هذه الحالة الخاصة».

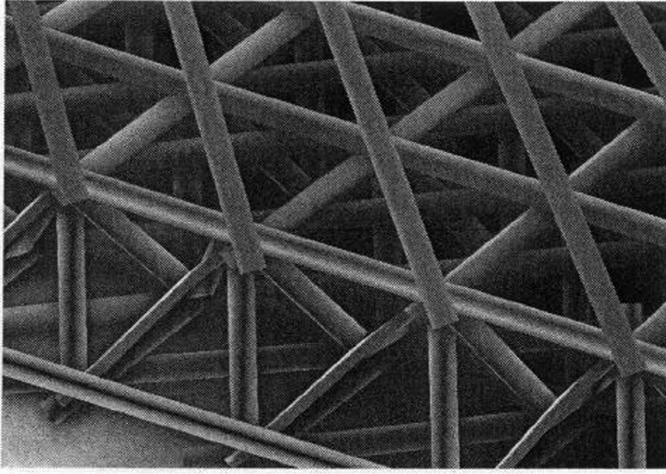
على سبيل المثال، تُنتِج إحدى تقنيات وايتسايدس أشكالاً معدنية تقع مقاساتها في المجال 1 ـ 100 ميكرون، ثم يحوِّل الترسيب الكهربائي تلك البُنى المعدنية المستوية إلى تجهيزات ثلاثية الأبعاد بوصل المكوِّنات الثنائية الأبعاد معاً (انظر الشكل 9 ـ 7).

حتى إنه يمكن استخدام النيكل في تطبيقات حيوية طبية، من قبيل تجهيزات التزوُّد بالدواء، لكن يجب طلي النيكل لدرء ردود الأفعال التحسُّسية المحتملة تجاهه. أما خواصه المغنطيسية فتجعل منه خياراً طبيعياً في التطبيقات المغنطيسية.

ومن المواد الأخرى التي يمكن أن تُستخدم في التطبيقات الثلاثية الأبعاد للترسيب الكهربائي النحاس الملحوم، ومواد مشتقة بالتشغيل الميكانيكي من السليكون. ويُستخدم الفولاذ غير القابل للصدأ والتيتانيوم والمواد المطلية بالذهب للأغراض الطبية الحيوية أيضاً. ويشتمل الترسيب الكهربائي أيضاً على طيف من البُنى الميكرويّة التي لا يمكن إنتاجها بتكاليف مقبولة بالوسائل المعتادة.

تساعد النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة المُحِسَّات الذكية الجديدة على التواصل في ما بينها، وعلى تبادل بيانات ومعلومات تشكيلاتها، وعلى التواصل أيضاً مع نظم التحكُّم بها البعيدة عنها. تتضمّن هذه المحِسَّات رقاقة تحتوي على صفحات بيانات إلكترونية تَخزِن موسّطات تعريفاتها وأوصافها الذاتية. وسوف تُسهِّل هذه الصفحات إعدادات المُحِس واستخدامه وصيانته، وذلك بجمع

بيانات عن حالته ومعايرته وضبطه آلياً، وهذا ما يلغي الحاجة إلى طرائق الضبط اليدوية المستنزفة للوقت، والمنطوية على إمكان ارتكاب الأخطاء. وسوف تجعل مكاملة المُحِسَّات ضمن النظم سهلاً كسهولة تركيب كابل فأرة في حاسوب.



**الشكل 9 ـ 7: أحزمة رابطة من النيكل الصافي ذات مقاسات في المجال 1– 100 ميكرون يمكن أن تُستخدم في طيف واسع من التجهيزات الضئيلة.**

إن المقدرة على وضع مزيد من الطاقة الحسابية في المُحِس تلغي الحاجة إلى بعض الملحقات الإلكترونية والبرمجية في مركز التحكّم. في الماضي كانت المُحِسَّات تجمع البيانات فقط، أما الآن فتستطيع نظم التحسُّس الذكية تحليل ومعالجة البيانات الملتَقطة قبل إرسالها إلى الحاسوب، وهذا ما يلغي الحاجة إلى المبدّلات التماثلية الرقمية في نظام التحكّم، ويخفّف العبء الحسابي عنه.

والنمو المستمر للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة يجعلها أيضاً

أكثر تطوراً. فقد أصبحت تقانة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة شائعة في تحسُّس الضغط والتسارع والارتفاع، وسوف يصبح الجيل القادم منها نظماً ميكرويّة معقّدة، لا مجرد مُحِسَّات.

فالتوجه الجديد هو مكاملة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مع دارات تحكُّم ميكرويّة ووصلات اتصال في علبة واحدة. حينئذٍ يمكن للمُحِسَّات الناتجة أن تجمع البيانات وتعالجها وتحللها وتُرسِلُها على الوصلة اللاسلكية إلى مركز التحكُّم.

وتتميز النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة بإمكان إنتاجها كمياً، وهذا ما يخفض التكاليف. صحيحٌ أن صنعها يتطلب غرفة نظيفة، إلا أن إنتاجها كمياً يعوِّض عن تكلفة إنشاء الغرفة النظيفة. والمحِسَّات المصنوعة من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة صغيرة نسبياً، ويمكن حشرها في أماكن ضيّقة لم تكن تتسع للمحِسَّات السابقة. وهذا شيء مهم، خصوصاً في التطبيقات الحيوية الطبية حيث هناك حاجة إلى زرع مُحِسَّات داخل جسم الإنسان.

ويُتوقَّع نمو المُحِسَّات القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في مجالات من قبيل مضخات الحقن الطبية، ومُركِّزات الأُكسجين، وأجهزة غسيل الكلى ومراقبة مستوى السكر في الدم. وسوف تكون تطبيقاتها في السيارات كثيرة أيضاً، خاصة في المُحِسَّات العطالية ومُحِسَّات مراقبة اهتراء العجلات. ومن تطبيقاتها الأخرى نظم التعرُّف اعتماداً على السمات الحيوية، والفوتونيات، ونظم الحرب الإلكترونية، والتحسُّس الكيميائي الحيوي، وغيرها مما هو مهم لأمن البلاد ومراقبة البيئة.

لدراسة إمكانات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، بنى المعهد (Southwest Research Institute) (SWRI) ما أسماه أول مرفق لتطوير

واختبار النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في ظروف الخلاء، وقد أدت اختبارات أخيرة إلى اكتشافات مهمة عن كيفية استخدام تجهيزات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في التطبيقات الفضائية[11].

إن تكاليف إطلاق الأحمال إلى الفضاء، التي تبلغ آلاف الدولارات للكيلو غرام الواحد، تبعاً للصاروخ الحامل، تجعل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مرغوباً فيها في ذلك المجال. لقد تحقَّق تصغير الإلكترونيات ووحدات التغذية الكهربائية والبُنى الإنشائية منذ سنوات، لكن تصغير أجهزة القياس العلمية كان أصعب، لأن كثيراً منها يحتاج إلى فتحات كبيرة لجمع العيّنات.

وبرغم أن تصغير تجهيزات القياس الفضائية ممكن، فإنه ليس عملياً لأن الحجم الصغير يعني إعطاء المُحِس إشارة أصغر، حيث يستقبل عدداً صغيراً من الجُسيْمات أو الفوتونات، ولا يستطيع قياس توزُّع الجُسيْمات ذات الكثافة المنخفضة أو الإشعاعات الضعيفة المقصود قياسها.

إلا أن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سوف تُمكِّن من تزويد أجهزة القياس الفضائية بفتحات كبيرة على شكل لوحات مسطّحة يمكن أن تكون أرقّ كثيراً من المحِسَّات الحالية. وسوف تُستخدم في أجهزة القياس الفضائية صفيفات من آلاف النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة المتشابهة التي سوف تسمح لجهاز تتعطل فيه بعض التجهيزات بالاستمرار في العمل بحساسية كاملة تقريباً.

يقول دايفد ماكُوماس (David McComas)، رئيس مرفق النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في معهد SWRI والمدير التنفيذي لقسم علوم وهندسة الفضاء فيه: «تنطبق القوانين الفيزيائية نفسها على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، أما طريقة عملها في ذلك السلّم من

الأبعاد، فهي مختلفة تماماً». ويضيف: «إن المفاعيل التي أنت معتاد على رؤيتها في الحياة العادية، الخاصة بالثقالة والعطالة، لا تعني إلا القليل للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، أما القوى الكهربائية الصغيرة، وتخميد الحركة في الهواء، فهي على درجة كبيرة جداً من الأهمية لها».

وجد الباحثون لدى SWRI أن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تعمل في الخلاء على نحو مختلف عن عملها في الجو العادي من ناحيتين: الجهود الكهربائية اللازمة للعمل الطنيني أقل كثيراً، وتضخيم الطاقة أكبر كثيراً. ووجدوا في أثناء الاختبار أن المهتزات احتاجت لكي تهتز إلى عُشْر الجهد الكهربائي الذي تحتاجه عادةً في الهواء.

وهذا مهم للتطبيقات الفضائية، لأن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الفضائية يمكن أن تكون قادرة على العمل عند جهود بين 10 و15 فولت، في حين أن التجهيزات الحالية تحتاج إلى جهود أعلى كثيراً، وهذا ما يتطلب وحدات تغذية أثقل وتكاليف إطلاقها إلى الفضاء أكبر.

لقد قلق الباحثون من الاحتكاك الالتصاقي ومن الالتحام في الخلاء، أي من نزوع الأجزاء المعدنية نحو الالتصاق معاً في الظروف الفضائية الذي يمكن أن يمثِّل مشكلة رئيسة للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. لكن ذلك لم يحصل حتى الآن.

ويعمل بخار الماء والهواء على تزليق سطوح النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة التي تتماس معاً أو تنزلق بعضاً على بعض. لكن في الخلاء، تفتقر الأجزاء المتماسة إلى تلك الطبقة من الغاز بين السطوح، وهذا ما يؤدّي إلى إمكان تبادل السطوح للذرّات والالتصاق في النهاية.

لكن معظم النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الفضائية، ومنها مقاييس المغنطيسية وأجهزة مراقبة تدرج الثقالة (مقاييس التسارع التي تقيس الثقالة النانوية)، تعمل عادة في علب محكمة السد، وربما تكون محجَّبة، وهذا يستبعد التعرُّض إلى الفضاء المفتوح، ويلغي القلق منه.

تُستخدم في صناعة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تقانات تصنيع ميكرويّة جرى تطويرها في السنوات الأخيرة لبناء بُنى ميكانيكية ميكرويّة. ويمكن لمثل هذه البُنى أن تتصف بكثير من المزايا مقارنةً بنظيراتها في المستوى الكبير، ومن تلك المزايا الكتلة والحجم الصغيرين، واستهلاك الطاقة المنخفض، والتحكّم الدقيق بالأبعاد، وإمكان الإنتاج المتكرر بالمواصفات نفسها، وإمكان خفض التكاليف حين إنتاجها كمياً، ووثوقيتها العالية.

يأمل الباحثون في الاسترجاع الجزئي للبصر لدى المرضى الذين يعانون تبقع الشبكية، وذلك بالاستعاضة عن مستقبلات الضوء التالفة بصفيفة من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. يمكن لوحدة مكوّنة من 1000 قطب إلكتروميكانيكي ميكروي أن توضع في كل شبكية ضمن سائل العين الزجاجي. وتوصل الرقاقة بأعصاب الشبكية الميكرويّة المقاس بأقطاب نابضية. وتحقِّق الأقطاب النابضية تماساً كهربائياً جيداً بقوة أصغرية، وهذا مهم لأن الشبكية لا تتحمل كثيراً من الضغط، وفق قول أحد الباحثين. والمدهش هو أن الخلايا القضبانية والمخروطية في الشبكية تقع بين الأعصاب، لا فوقها، وهذا ما يجعل وصل الصفيفة بالأعصاب مباشرةً أسهل. والنسُج التي تغلف الأعصاب شفافة نسبياً.

وتُرسِل كاميرا صغيرة مثبتة مع مرسل راديوي على نظارة المريض المعلومات والطاقة إلى صفيفة النظم الكهروميكانيكية

الميكرويّة عبر هوائي ووحدة استقبال مزروعة في كرة العين. والفكرة هي تحريض بعض نهايات الأعصاب مباشرة لتوليد صور جيدة بقدر يكفي لقراءة أحرف كبيرة والتمييز بين الأشياء في الغرفة. يقول مايك دايلي (Mike Daily)، مدير مختبرات سانديا[12]: «سوف نستخدم في البداية نهجاً خشناً يحرِّض مجموعة من الأعصاب، إلا أن هدفنا النهائي هو تحريض الأعصاب إفرادياً».

واستُخدمت رقاقات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في أكياس الهواء في السيارات منذ تسعينيات القرن العشرين. وهي توضع الآن في الدمى ومنظمات الإيقاع وأجهزة الإسقاط. حتى إن المهندسين يضعونها في سماعات الأذن التي يستعملها سائقو سيارات سباق إنديانابوليس الشهير لتسجيل قوى التسارع التي تتحملها رؤوسهم. لقد بدأوا بذلك فعلاً.

يسمح بناء المحِسَّات الصغيرة بالتحسُّس والتحكُّم غير المركزيين، وبالاستجابة الموضعية السريعة، وباستهلاك أدنى للطاقة. وتسمح تقنيات صنع أنصاف النواقل بتصنيع المحِسَّات كمياً على دفعات، ولذا يجعل كثيراً من المنتجات الجديدة، من وسائد الهواء في السيارات، حتى رؤوس الطباعة بنفث الحبر، ومُحِسَّات ضغط الدم وغيرها مما يُهمل بعد أول استخدام، مجدية التكلفة. والأمثلة التالية تمثّل غيضاً من فيض من تصاميم النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الجديدة التي تبحث عن تطبيق[13]. فإضافة إلى التطبيقات التي سبق ذكرها ومناقشتها، هناك التحكُّم بسرعة المحرّك وإيقافه، والمحرّكات الميكرويّة، وكرات الملاحقة وعصي القيادة، وسيور النقل، والمكوِّنات الروبوتية، وتجهيزات التحكُّم بتوضُّع دمى الفيديو والدمى المزوّدة بمحرّكات، ومفاتيح برامج الأدوات الكهربائية المنزلية.

وعرض غيتار نانوي في جامعة كورنِلّ بوصفه وسيلة إيضاح لطرائق صنع تجهيزات ميكانيكية من دون ميكرويّة باستخدام تقنيات مصمّمة لصنع الإلكترونيات الميكرويّة. كانت أوتار الغيتار قضباناً من السليكون مقاس مقطعها العرضاني يساوي 150 نم × 200 نم، وتقع أطوالها في المجال 6 ـ 12 مم. وتهتز الأوتار عند تردّدات أعلى بـ 17 أوكتاف من تردّدات الغيتار الحقيقي. وتُشغَّل هذه التجهيزة بضرب الأوتار بحزمة ليزر مبأَّرة فيها، فتهتز وتولِّد أنماط تداخل في الضوء المنعكس عنها، وتُحوَّل الأنماط المنعكسة إلكترونياً إلى موسيقى مسموعة.

إن المقدرة على صنع أشياء تهتز عند تردّدات عالية تفتح الباب إلى كثير من التطبيقات الإلكترونية المحتملة. على سبيل المثال، تُستخدم في الهواتف الخلوية والتجهيزات اللاسلكية الأخرى مهتزات من بلّورات الكوارتز لتوليد التردّد الحامل الذي تُرسل عليه أو تولف الإشارة المستقبلة. إن قضيباً نانوياً ضئيلاً مهتزاً يمكن أن يؤدّي الوظيفة نفسها في حيّز أصغر مع استهلاك لبضعة الميلي واط فقط من القدرة. ويمكن استخدام تلك القضبان أيضاً في الترشيح الحاد جداً في أجهزة الاتصالات، وفي كشف الاهتزازات للمساعدة على تحديد مواقع الأشياء، أو لكشف أصوات خافتة للتوقّع بتلف الإنشاءات والآلات.

ونظراً إلى أن النظم الكهروميكانيكية النانوية يمكن أن تُعدِّل الضوء، يمكنها أن تجعل اتصالات الألياف الضوئية أقل تكلفة. فبدلاً من استخدام ليزر عند كل نهاية من كابل الليف الضوئي، يمكن لليزر قوي عند إحدى النهايات إرسال حزمة تُعدَّل وتُعكس بتجهيزات كهروميكانيكية نانوية أقل تكلفة .

يقوم الباحثون في جامعة أوهايو الحكومية، بالتعاون مع شركة

IMEDD Inc. في ماونتِنفيو بكاليفورنيا، بتطوير تجهيزات عدة كهروميكانيكية ميكرويّة يمكن زرعها في جسم الإنسان للتحكُّم بتحرير الدواء. تُستخدم في هذه التجهيزات مرشِّحات ذات مسامات ميكرويّة شديدة التجانس وتعمل كأغشية محدِّدة لمعدَّل تحرير الدواء من خزان دواء. وهذا ما يمكِّن من استخدام قطعة واحدة تُزرع في الجسم بدلاً من الحقن المتعدّد. ويستقصي الباحثون أيضاً فكرة زرع أدوية مختلفة عدة معاً، واستخدام الغشاء لإطلاقها بمعدّلات مختلفة وبفواصل زمنية مختلفة. وهذا ما سوف يجعل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة المزروعة ملائمة للمعالجة الكيميائية والحيوية للسرطان أيضاً[14].

ويهتم أولئك الباحثون أيضاً بالمحافظ الحيوية التي تحتوي على تلك المرشحات. فأحد أنواعها ملائم خصيصاً لزرع مجموعة خلايا بطريقة تدرأ رفضها من قبل الجهاز المناعي، وهو موجَّه إلى معالجة مرضى السكري من النوع الأول. إن زرع هذه الجزر الضئيلة من الخلايا سوف يوفّر وسيلة طبيعية لتنظيم مستوى السكر في الدم من دون حقن خارجي بالإنسولين. وسوف يساعد نظام مشابه المرضى الذين يعانون مرض الناعور أو الاضطرابات العصبية.

وهناك محفظة حيوية كهروميكانيكية ميكرويّة أخرى في قيد التطوير توفّر طريقة لزرع الإنزيمات في المرضى الذين يعانون اضطرابات عوز الإنزيمات، ومنها مرض كانافان (Canavan). غالباً ما تُحبَط محاولات استبدال الإنزيمات في الجسم لأنه يتخلص منها سريعاً بعد الحقن. أما المحفظة القابلة للزرع، والمسمّاة المفاعل الإنزيمي، فتحتفظ بالإنزيمات مدة أطول وهي صالحة حيوياً.

وثمة تجهيزة كهروميكانيكية ميكرويّة أخرى تُطلِق بدقة طلاءات ولحاماً مصهوراً وأحباراً باستخدام الأمواج الصوتية. تُستخدم في

تجهيزات القذف الأخرى، ومن أمثلتها طابعات نفث الحبر، تجهيزة كهروضغطية لتوليد ضغط داخلي خلف فوهة النفث. أما القاذف الميكروي الصوتي، فلا توجد فيه فوهة نفث، بل تُستخدم فيه الأمواج الصوتية لتكوين منطقة ضغط، يمكنها إما أن تقذف قطيرات نانوية، أو تكوِّن نافورات منخفضة السرعة على سطح حوض مفتوح من سائل.

يحتوي النظام على محوال مصنوع من قضيب دارئ (Buffer) من الكوارتز، أو الياقوت الأزرق، مع عدسة صوتية تحرف الصوت قليلاً فوق نهاية القذف، وقرص من مادة كهروضغطية ملصوق بالنهاية المقابلة. يُصدر المِحْوال رشقات من التردّدات فوق الصوتية مبأَّرة بالعدسة على سطح السائل. ويجعل ضغط الحزمة المبأَّرة السائل يرتفع ويشكِّل نافورة أو قُطيرات متطايرة، ويكون ارتفاع النافورة أو حجم القُطيْرة متناسباً مع التردّد فوق الصوتي الذي يُصدره المحوال. تزيد التردّدات فوق الصوتية هنا على 100 ميغا هرتز، مقارنةً بحالة نفث الحبر حيث تكون التردّدات بين 10 و20 كيلو هرتز. لذا تُعتبر المُصدِرات القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة أقرب إلى المجهر الصوتي من طابعات نفث الحبر.

إن إحدى المزايا الجلية لهذا النظام هي عدم وجود منفّث ينسد، ولذا يمكنه إطلاق معادن مصهورة باستمرار. يُضاف إلى ذلك أن التجهيزة تُطلق القطيرات بسهولة عند سرعات منخفضة، وهذا إنجاز لم يكن ممكناً تقريباً بالتقانات التي تستخدم الفوهات النفاثة. ويجعل نظام الإطلاق هذا بسرعة تساوي الصفر تقريباً النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة فوق الصوتية ملائمة للتطبيقات الفضائية.

يعمل النظام في الخلاء وعند درجات حرارة عالية، ويستطيع التحكّم بحجم القطرة ليكون بين 25 و250 ميكروناً. إن نظام الإطلاق

الميكروي هذا، الذي طوَّره مركز بحوث غلين التابع لوكالة الفضاء الأميركية في كليفلاند بأوهايو، حين عمله بنمط النافورة، يحفر أو يطلي من دون الحاجة إلى أقنعة، ويقال إنه يوضِّع وسائد وكُرات اللحام بدقة طابعات نفث الحبر(14).

وتعمل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة كمنبع صغير لضوء عريض المجال، معطية قدرة ضوئية تساوي 250 ميلي واط على مجال من أطوال الموجات، يمتد من 500 حتى 900 نم. ويقوم مركز غلين التابع لناسا، ومختبرات الدفع النفاث ومعهد ابتكارات الإضاءة بكليفلاند، بتطوير تجهيزات إضاءة لاستخدامها في المُحِسَّات الضوئية، ومنابع لمعايرة مقاييس الطيف، وإضاءة الشاشات.

يتصف منبع الضوء الإلكتروميكانيكي الميكروي بشكل مستوٍ، ويمكن وصله بسهولة مع الألياف الضوئية وإلكترونيات سوّاقات الأقراص. وهو يتطلب قدرة دخل كهربائية أقل مما تتطلّبه منابع الضوء التجارية، إضافة إلى أنه صغير ومتين وخفيف الوزن(14).

وثمة جيل جديد من الآلات الميكرويّة آتٍ إلى الأسواق. حتى الآن، تؤدّي النماذج التجارية من المُحِسَّات والمفعِّلات الصغيرة المبنية على رقاقات سليكونية مهمات بسيطة كوصل وفصل إشارات الاتصالات، أو قدح وسائد هواء الحماية في السيارة. إلا أن الموجة القادمة من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سوف توفّر تجهيزات تؤدّي طيفاً واسعاً من المهمات بتكاليف أقل وكفاءة أعلى. ومن تلك التجهيزات منتجات متقدمة من هذه التقانة يمكن أن تغيِّر كل شيء، من جراحة العين حتى الهاتف الخلوي.

ومفتاح هذه التطبيقات الجديدة هو سيرورة تصنيع متطورة، تكاليفها معقولة، تكدِّس خمس طبقات من أغشية سماكة كل منها 2.5 ميكرون على الرقاقات بدقة تامة. إن هذه الطبقات الإضافية من

المُحِسَّات والمسننات والإلكترونيات، مقارنةً بالنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة التجارية التي تتكوّن عادةً من طبقتين أو ثلاث طبقات، لا تمكِّن من صنع آلات أشدّ تعقيداً فحسب، بل توفّر أيضاً مزيداً من المرونة في تصميم المنتَج.

ويمكن لهذا التعقيد أن يبدأ قريباً بالدخول إلى هاتفك الخلوي. فقد جرى تطوير مكوِّنات هواتف خلوية قابلة للتوليف وتتحسَّس تغيّرات شدّة الإشارة، الناجمة عن تغيّرات الطقس والبُعد عن أبراج المحطات الخلوية، وتستطيع ضبط دارات الجهاز آلياً للتعويض عن ضعف الإشارة. وهذا يعني انخفاضاً في عدد المكالمات التي تنقطع بسبب ضعف الإشارة، وجودة صوت أفضل، وعمر بطارية أطول. وثمة أيضاً في قيد التصنيع صفيفات مرايا قابلة للتحريك سوف تسمح للمرضى أن يروا سلفاً مفاعيل بعض عمليات العين الجراحية، وذلك بالنظر من خلال نظارة عينية خاصة. تعمل المصفوفة على الترشيح الدقيق للضوء الذي يتفاعل مع القرنية على أساس نماذج حاسوبية للعملية الجراحية.

ويُتوقَّع رؤية هواتف خلوية مع مكوِّنات قابلة للتوليف في عام 2005، وأول محاكٍ لعملية العين الجراحية في عام 2007. وبدعم من مستثمرين كبار، ومن خلال منح الحكومة الأميركية، صُنعت منتجات متقدمة من قبيل أدوات الجراحة الميكرويّة والتجهيزات الحيوية القابلة للزرع في الجسم لتزويده بالدواء آلياً.

## الإمكانات المستقبلية

يُعدُّ تعليب النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مفتاح التبنِّي الواسع لتقانتها. فالعلبة، تعريفاً، هي أداة تحمي النظم الكهروميكانيكية

الميكرويّة والدارات المتكاملة من التلف والتلوُّث. وثمة نهجان أساسيان للتعليب. في الأول تُستخدم علبة مستقلة لكل وحدة من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة بعد عزل الشرائح. يعني عزل الشرائح تشريح التجهيزات إفرادياً من الشراحة التي رُسِّبت أو حُفرت منها. يُستخدم التعليب بعد العزل غالباً في حالة إعداد النماذج الأولية أو في حالة الإنتاج المحدود. والنهج الآخر المفضَّل في حالة الإنتاج الكمي يُضيف العلبة قبل العزل. وهناك كثير من الطرائق المختلفة في هذا النهج[15].

هناك مشكلة تتمثل بافتقار صناعة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة اليوم إلى المقْيَسة. فنظراً إلى وجود تطبيقات شديدة التنوُّع للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة وتقاناتها، فإن وضع مجموعة من المقاييس يُعتبر مهمة صعبة، إن لم نقل مستحيلة. على سبيل المثال كيف يمكن وضع مقاييس تحكّم النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في كل من تطبيقات السيارات والتطبيقات الطبية؟

يبدو أن الحل يكمن في مقاييس صناعية عامة ومقاييس تطبيقات مستقلة. وقد شكَّلت الهيئة الدولية لمواد وتجهيزات أنصاف النواقل (Semiconductor Equipment and Materials International) (SEMI)، لجنة لصياغة مقاييس لتصنيع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. فقد يكون الحل كامناً في دراسة المقاييس التي جرى تطويرها فعلاً لصناعة أنصاف النواقل التي تتصف بدرجة كبيرة من قابلية التطبيق على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. فكثير من السيرورات في صناعة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تشابه تلك الخاصة بصناعة أنصاف النواقل. لذا على مصمِّمي النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة أن يدرسوا تلك المقاييس.

وسوف تنمو سوق تجهيزات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

ومنتجاتها في الولايات المتحدة بأكثر من 20 في المئة سنوياً حتى عام 2006. إن ما سوف يجعل تلك السوق تزدهر هي الابتكارات التقانية التي تؤدّي إلى تكاليف منخفضة وأداء أفضل يمكّنان من توسيع طيف تطبيقات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة كثيراً ليشتمل على مجالات من قبيل الاتصالات والتقانة الحيوية والإلكترونيات الاستهلاكية وغيرها. لكن ما هو أهم من ذلك هو تطوير مقاييس للتصميم وطرائق التصنيع، ولتقنيات التعليب والاختبار أيضاً، تعزّز الإنتاج الكمي وما يؤدّي إليه من خفض لتكاليف الإنتاج.

أما أفضل توقعات النمو لمنتجات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة خلال النصف الثاني من هذا العقد فسوف تكون في قطاع الاتصالات. تقوم تلك التوقعات على ظهور البدّالات الضوئية الصرفة في شبكات الألياف الضوئية، والظهور الأولي لبدّالات التردّدات الراديوية والتجهيزات الأخرى القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في الجيل القادم من الأجهزة الخلوية. وسوف تنتعش الأسواق ذات الصلة بالمجال الطبي الحيوي مع اتساع استخدام النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في التجهيزات القابلة للزرع في الجسم وفي تحريض الأعصاب ومراقبة مستوى السكر في الدم، وفي التقانة الحيوية (الرقاقات الحيوية، والمختبرات على الرقاقة... إلخ). أما سوق النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الراسخة الخاصة بالسيارات فسوف تنمو بسرعة أقل برغم وجود فرص مهمة في تطبيقات بازغة، ومنها مراقبة ضغط الهواء في العجلات، وتحديد وضعيات الأشخاص وإرسالها إلى نظم الحماية، والنظم اللاسلكية المتقدمة. يُضاف إلى ذلك أن ثمة فرصاً جيدة لتقانات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في تطبيقات الإلكترونيات الاستهلاكية، خصوصاً العناصر البصرية الضوئية، ومنها نظم المسرح المنزلي والتلفاز الرقمي وألعاب

الفيديو المتقدمة. أخيراً، سوف تسجّل القطاعات العسكرية والجوية الفضائية والصناعية نموّاً سريعاً في الحاجة إلى النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، لكنها سوف تبقى أسواقاً صغيرة لكون هذه التطبيقات أشدّ تخصصاً.

## تطوّرات التعليب

ثمة اعتبارات تصميمية ضرورية لتحقيق فهم أفضل للصعوبات الفريدة التي تواجه مهندسي تعليب النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مقارنةً بتعليب الدارات المتكاملة العادية. فالتجميع الآلي للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة يتطلب استمثال تجهيزات التعليب وسيروراته.

يستمر صنع المنتجات القائمة على تقانة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة بكميات قليلة نسبياً مقارنةً بالسوق الكبيرة للذواكر والمعالجات الصغرية. إلا أن كثيراً من دراسات السوق تتوقّع أن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سوف تنمو بمعدل سنوي مركَّب يساوي 17 ـ 20 في المئة خلال السنوات الأربع القادمة[16].

## الصعوبات التي تواجه النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة

تفرض التطبيقات ما تحتاج إليه من التجهيزة الكهروميكانيكية الميكرويّة المعلبة من حيث الأداء الوظيفي والوثوقية. وتتضمّن تحدّيات التعليب التقَنية التكلفة وإجهادات العلبة والتحجيب الكهربائي والحماية من المعلقات في الهواء وإحكام العزل.

إن تعليب الدارات المتكاملة ناضج وهو يمثِّل نحو 30 ـ 95 في المئة من كامل تكاليف تصنيع الدارات المتكاملة. أما تكاليف تعليب النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة فتمثِّل 70 ـ 90 في المئة من تكلفة

التجهيزة. إن تخفيض إجهادات العلبة، والحماية من الجُسيْمات المعلقة في الهواء في أثناء التصنيع ومتطلبات الكتامة، إضافة إلى انخفاض معدّل الإنتاج، تؤدّي جميعاً إلى زيادة تكلفة تعليب النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. إن اختيار مادة التعليب مهم جداً لتقليص إجهادات العلبة وطرد الملوثات الغازية للبنى الكهروميكانيكية الميكرويّة الضئيلة.

يمكن أن تساعد نمذجة التصميم المصمِّمين على استبعاد الأشياء غير المهمة من علب النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة بغية تقليص التكلفة. إلا أن نمذجة أداء النظام برمّته تصبح صعبة عند اشتمالها على العلبة والمكوِّنات واللواصق والوصلات بين المكوِّنات، إضافة إلى التأثيرات الممكنة في العلبة الناجمة عن تركيبها على الدارات المطبوعة، وعن الظروف الحرارية... إلخ.

## اعتبارات تصميم أتمتة التجميع

يُعتبر التجميع المؤتمت، باستخدام أجهزة التقاط العناصر وتوضيعها في أمكنتها، هدفاً لكثير من التقنيات الواعدة بالمرونة القصوى في التجميع والتعليب الشاملين للنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، فأجهزة التقاط العناصر وتوضيعها في أمكنتها تسمح للمصمّمين باختيار مكوّنات من مصادر متعدّدة ووصلها معاً ووضعها ضمن علبة واحدة. وبرغم أن التجميع يمكن أن يتحقَّق بتقنيات ربط الشُراحات معاً ومعالجة أنصاف النواقل، فإن النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة ضعيفة وتحتاج إلى تداول بعناية وحذر.

تتضمّن اعتبارات تصميم تعليب وتجميع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة شكل المكوِّن الذي سوف يُقدَّم إلى تجهيزات التجميع،

وعلامات تعريف العلبة والتجهيزة الكهروميكانيكية الميكرويّة، وتحديد منطقة عدم لمس التجهيزة، ومتطلبات أدوات الالتقاط الخاصة، وتوافق المواد مع المكوِّن والتطبيق، ومقدار نظافة السيرورة، ودقة التوضيع وخوارزمياته (التوضيع الشامل والنسبي)، وطرائق ومواد الوصل، وطريقة التكديس الوحيدة المستوى أو المتعدّدة الشرائح، وطريقة وصل الرقاقات بالوسط الخارجي.

**تقديم المكوِّن إلى تجهيزات التجميع**: يمكن تقديم النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة إلى أجهزة التجميع على حوامل متنوعة، منها الحامل الحلقي (Waffle Pack)، والحامل الهلامي (Gel pack)، والشريط والبكرة (Tape and Reel)، والشراحة. ويمكن للعلبة أن تكون إطاراً رئيساً أو شريطاً أو لوحة أو علبة منفصلة. وتبعاً لحجم الإنتاج وخطة التصنيع، يمكن لخلايا التجميع أن تكون وحدات منفصلة مع مشغّلين يقدمون المواد يدوياً، أو نظم تغذية بالمواد تامة الأتمتة مع تكامل ضمن خط الإنتاج لسيرورات إدخال وإخراج المواد.

**علامات تعريف العلبة والتجهيزة الكهروميكانيكية الميكرويّة**: إن العلامات والوشمات الفيزيائية التي يمكن أن يُميِّزها نظام معالجة الصورة الآلي شديدة الأهمية للتجميع الآلي السليم. لذا تجب مراجعة مواضع وأحجام وأشكال العلاّمات والمواد المصنوعة منها في وقت مبكر من عملية التصميم. تُشكَّل علامات التعريف مثالياً في الخطوة نفسها التي يجري فيها صنع المكوِّن، وتكون علامات تعريف العلبة عادةً أكبر من علامات تعريف النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة وأقل تكراراً. إن دقة صف النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في العلبة تعتمد كثيراً على علامات تعريف كل من العلبة وتلك النظم.

**مناطق عدم لمس النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة ومتطلبات أدوات الالتقاط الخاصة**: ثمة في كثير من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مناطق حساسة تتلف إذا لُمست بأداة الالتقاط. لذا يجب تصميم أدوات التقاط خاصة لتجنب المناطق الحساسة. في بعض الحالات يُستخدم ملقط مكوّن من ذراعين أو أربعة أذرع لالتقاط القطعة من حوافها تماماً. يجب أن تكون أجهزة الالتقاط والتوضيع قادرة على صف تلك الأدوات الخاصة فوق الحامل. يمكن أيضاً استخدام أدوات ذات قاعدة مسطّحة إذا أمكن توضيع الأداة على منطقة قادرة على التحمل من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة.

**توافق المادة مع المكوّن والتطبيق**: تُختار المواد بحيث تكون متوافقة كيميائياً وميكانيكياً وكهربائياً وبصرياً، فالعلبة، والتجهيزة الكهروميكانيكية الميكرويّة، ومواد اللصق تكوِّن نظاماً معقّداً يمكن أن يؤثِّر في أداء التجهيزة كثيراً حين تعرُّضها إلى المعالجة في أثناء التصنيع، أو إلى الظروف البيئية. لقد شكَّلت التجهيزات الميكرويّة البصرية بعض أصعب التحديات للعاملين في حقل التعليب.

**نظافة السيرورة**: يجب ألا يؤدّي التجميع والوصل والتعليب إلى التلوُّث الذي يُسيء جداً إلى التجهيزة. لذا يجب اختيار مواد اللصق وسيرورات الوصل والشَيّ بعناية لدرء التأثيرات السيئة في التجهيزة في أثناء التصنيع.

**دقة التوضيع وخوارزميات الصف**: يعتمد التوضيع الشامل على مجموعة محدّدة من علامات تعريف العلبة التي توضع جميع المكوِّنات وفقاً لها. ويمكن لخوارزميات التوضيع النسبي أن توضِّع بعض المكوِّنات بالنسبة إلى أخرى وُضِّعت من قبل، حيث تقوم هذه الخوارزميات بتحديد نقطة توضيع مكوّن ضمن العلبة بصرياً، ثم توضِّع المكوّن التالي بالنسبة إلى السابق.

**التكديس الوحيد أو المتعدّد الطبقات**: ثمة نزعة قوية نحو وضع مزيد من الوظائف في وحدة المساحة من العلبة. لذا يقوم المصنِّعون اليوم بتكديس طبقات من التجهيزات بعضاً فوق بعض حيثما كان ذلك ممكناً. يتطلب تكديس الطبقات التوضيع النسبي، ومن الممكن أن يتطلب وضع لاصق على المنصة نفسها إذا كان التكديس يحصل بتمريرة واحدة عبر آلة التجميع.

**طريقة وصل التجهيزة مع العالم الخارجي**: إن اختيار طريقة الوصل مع العالم الخارجي، باللحام المباشر على الدارة المطبوعة أو بواسطة أسلاك، تؤثّر في كثير من الجوانب التي ناقشناها، ويجب إيلاؤها عناية تامة من أجل الوثوقية والتكلفة.

**الجدول 9 ـ 1**: استخدامات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة الحالية.

| القطاع | التطبيق |
|---|---|
| السيارات | مُحِسَّات ضغط (تدفئة وتهوية وتكييف هواء، حقن الوقود، علبة السرعة، العجلات)، مُحِسَّات تدفق، مقاييس تسارع (وسائد هوائية، نظام التعليق)، جايروسكوبات (مضادات انقلاب، ملاحة، تحكُّم، ديناميكي بنظام الفرملة الآلي) |
| الطيران والفضاء والجيش | مُحِسَّات حرارة، مُحِسَّات كيميائية (غازات، أنف تحليل)، سطوح فاعلة للتحكُّم بالطيران |
| الطب والطب الحيوي | مُحِسَّات ضغط (دم، أوعية)، نظم حقن ذات فوهات ميكرويّة، مُحِسَّات سوائل ميكرويّة، اختبار الدنا (مسابر جينية)، مزروعات (منظم نبض القلب)، مساعدات سمع |
| تقانة المعلومات | خزن البيانات (رؤوس القراءة والكتابة)، لوحات إظهار، أجهزة إسقاط فيديوية (مرايا)، رؤوس طباعة بنفث الحبر |
| الاتصالات | بدالات (راديوية/ ضوئية)، مضخمات ضوئية متغيرة، منضدات ضوئية لإدخال وإخراج القنوات من الحزمة، ليزرات قابلة للتوليف، أجهزة تحريضية، مهتزات طنينية، مُحِسَّات أمواج ميكرويّة |
| المستهلك | مقاييس تسارع (للدمى)، جايروسكوبات (منصات تصوير مستقرة) |

## أعمال مستقبلية

تغطي المنتجات القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة طيفا واسعاً من التطبيقات (انظر الجدول 9 ـ 1). لذا فإن علب هذه النظم تستدعي أن تكون لها أشكال مختلفة وهيئات متنوعة. وهذا يعني أن تكون الآلات المُستخدمة في تجميع النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة مرنة من حيث التعامل مع معايير تعليب متعدّدة.

## الهوامش


1. www.ceel.nist.gov / 812 / test-structures.
2. P. I. «O'Rourke, Beyond the Sixth Sense,» *Time,* (January 12, 2004), pp.40-45.
3. *NIST Tech Beat* (March/April 200L), p. 3.
4. J. P. Sercel, «UV Lasers for MEMS & MOEMS Micro-Machining,» *Photonics Tech Briefs* (January 2004), p.2a.
5. S. Prasad, T. Christenson and M. Rugger, «Tribological Coatings for LIGAMEMS", *AM&P* (December 2002), pp. 3O-33.
6. E.- H. Yang and D. Wiberg, «Wafer-Level Membrane - Transfer process for Fabricating MEMS,» *NASA Tech Briefs* (January 2003), pp. 58-60.
7. C. R. Forest, «The Future of MEMS: Big Expectations for Small Products,» *NASA Tech Briefs* (August 2002), pp. 25 - 28.
8. J. M. Jackson, «MEMS: Smaller Is the Next BIG Thing,» *NASA Tech Briefs* (August 2001), pp. 16-20.
9. J. S. Zabinski and P. Meltzer, Jr., «Monolayer Protective Coatings,» *AFRL Technol. Horizons* (June 2003), pp. 34-35.
10. V. H. Heffernan, «Nickel in Nanotechnology,» *Nickel*, 15(4), 11 (2000).
11. B. Rosenberg, «MEMS the Word in Space Instruments,» *Av.*

*Wk. Sp. Technol.* (24 March 2003), p. 71.
12. L. Kren, «Helping Blind People See,» *Machine Design* (24 October, 2002), p. 50.
13. D. Bak, J. Ogando and D. Normile, «Small Parts, Big Potential,» *Design News* (21 January 2002), pp. 60-64.
14. R. Khol, «No More Needles: Implantable Microdevice Dispenses Medication,» *Machine Design* (6 April, 2000), pp. 128-130.
15. T. Glenn and S. Webster, «Packaging Microscopic Machines,» *Machine Design* (7 December 2000), pp. 126-130.
16. D. D. Evans, Jr., «Advances in MEMS Packaging,» *Advanced Packaging* (April 2004), pp. 19-21.

## المراجع

Hecht, J. «Optical MEMS Are More than Just Switches.,» *Laser Focus World*: September 2003, pp. 95-98.

Sercel, J. P. «Ultraviolet Laser-Based MOEMS and MEMS Micromachining: An Alternative to wet Processing.,» *Advanced packaging*: April 2004, pp. 29-31.

«Ultrahigh Density Scalable Digital Control of Microelectromechnanical Systems.,» p. 1, http:// jazz.nist.gov/atpcf/prjbriefs/prjbrief.cfm? ProjectNumber = 00-00-5352.

Vettiger, P. and G. Binnig. «The Nanodrive Project.,» *Scientific American*: January 2003, pp. 47-53.

Wiberg, D. [et al.]. «Miniature Gas-Turbine power Generator.,» *NASA Tech Briefs*: January 2002, p. 56.

# 10

# خلايا الوقود

## تقديم

بدأ مستقبل توليد الطاقة فعلاً. قبل مئة سنة، كانت الطاقة تعني المحرّكات البخارية وما شابهها. وكان منها الكثير هنا وهناك، وكانت الكهرباء لا تزال شيئاً مستجداً. لكن الأشياء تغيرت، فبحلول منتصف القرن العشرين، كان معظم العالم الصناعي يَستخدم الطاقة الكهربائية المولَّدة من الطاقة المائية. وقد بلغت الطاقة المائية الآن أقصى حدودها، والطبيعة تعمل على شلِّها في دورات من الجفاف. والنفط ليس مورداً لامنتهياً، وثمة مشكلات التلوّث الناجمة عن الفحم والنفط. إن ثمة اهتماماً بالغاً في توليد الطاقة الموزَّع الودود للبيئة الذي يحفظ الجو من الاحترار.

واليوم، ما زلنا نولّد الطاقة كما كنا نولّدها قبل خمسين عاماً تقريباً، مع أن الأحوال قد تغيّرت. فعدد السكان المتنامي وتزايد التصنيع يزيدان من طلب الطاقة كل عام، في حين أن تلبية الطلب تبقى موضع تساؤل. فعصر محطات توليد الطاقة الكهربائية القائمة على الغاز والنفط في طريقها إلى الإغلاق مع نضوب احتياطيات النفط وتزايد القلق البيئي. ففي الولايات المتحدة، على سبيل المثال،

امتزجت سياسات الطاقة الخاطئة مع مشاكل توزيع الطاقة في أزمة الطاقة في عام 2001. فقد كشفت فضيحة الشركة Enron عن مناورات مشكوك فيها في سياسة الطاقة، نجمت عن سوء إدارة الشركة. ويبدو أنه مهما كان نوع مصدر الطاقة، فإن الناس يجدون طرائق لتعقيد المشكلة من خلال سوء الإدارة.

وليس من المحتمل أن يتغيّر الناس، إلا أنه يبدو أن من الضروري تغيير طرائق وأنماط إنتاج الطاقة مع تزايد الحاجة إليها، أي إلى الطاقة المتاحة غير الملوِّثة التي يمكن تحمُّل تكاليف توليدها، والقابلة للتكييف مع تطبيقاتنا المحمولة المطَّردة التزايد. إن الهيدروكربونات ليست هي المستقبل، فهي في قيد النفاد، ومخلَّفاتها تلوِّث كوكب الأرض. لقد قُضي الأمر. فماذا نفعل؟ ثمة فرص لتسويق خلايا الوقود تجارياً موجَّهة الآن نحو مجالات عدة واسعة النطاق منها، على سبيل المثال لا الحصر، تحديث محطات الطاقة الموجودة وإنشاء محطات توليد مركزية، وإنتاج مولدات صناعية ومنزلية وتجارية وغيرها. إننا داخلون إلى موارد الطاقة الطبيعية المتجدّدة، ومنها خلايا الوقود. توجد خلايا الوقود في بعض التطبيقات الثابتة والمحمولة والمنزلية. أما التطبيقات المستقبلية فيبدو أنها سوف تكون في محرّكات السيارات والحافلات. فما هي تقانة خلايا الوقود التي سوف تكون السبَّاقة إلى السوق، وأين سوف تُستخدم؟

تتصف خلايا الوقود بكفاءة متميزة وتلويث قليل، وبالبساطة المتأصّلة فيها. إن هذه الخصائص، إضافة إلى السوق الهائلة المحتملة لتوليد الطاقة، وقطاعي الآليات والأجهزة المحمولة، تضع خلايا الوقود ضمن أكثر تقانات تحويل الطاقة البازغة أهمية. فهي تُعتبر الآن بالمقدمة في مجالات أساسية، منها توليد الطاقة الموزَّع،

والتوليد العديم التلويث أو المنخفض التلويث المستخدم في آليات نقل الحركة في العربات. وسوف تظهر مصادر طاقة جديدة خلال العقد القادم مع التطوّرات المنجزة في الأجيال الجديدة من الطاقات البديلة والبطاريات. ومن المحتمل أن تصبح خلايا الوقود متاحة بأحجام كبيرة للدبابات، وبأحجام صغيرة للجنود.

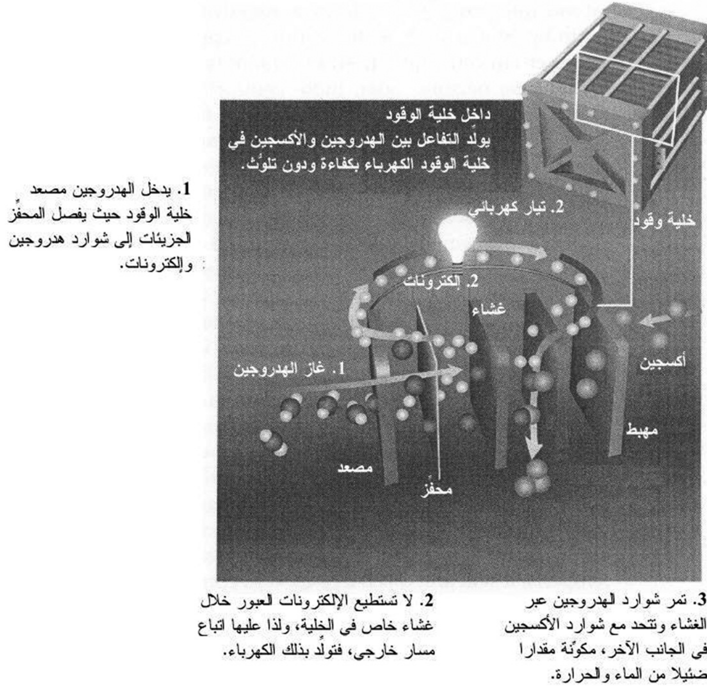
## ما هي خلية الوقود؟

إن خلية الوقود هي تجهيزة كهروميكانيكية تحوّل وقود الهيدروجين $H_2$ إلى كهرباء من دون احتراق. والناتجان الثانويان الوحيدان عن العملية هما الحرارة وبخار الماء، وهذا ما يجعل طريقة توليد الكهرباء هذه مثلى بيئياً.

ثمة عدد هائل من التطبيقات لهذه التقانة، من تأمين طاقة رئيسة أو احتياطية للأبنية والمعامل، إلى تغذية الهواتف النقالة والحواسيب المحمولة والإلكترونيات المحمولة الأخرى. إلا أن أكثر استخداماتها انتشاراً حالياً هو في السيارات، وقد تعزَّز ذلك بالتشجيع القوي من قبل حكومات الولايات المتحدة والاتحاد الأوروبي واليابان.

صحيحٌ أن تطور هذه التقانة بطيء الخطى، إلا أن إمكانات نموّها كثيرة: يمكن لسوق خلايا الوقود أن يصل إلى 35 مليار دولار بحلول عام 2013، وفقاً لتقرير أعدته شركة أبحاث السوق (Allied Business Intelligence) بنيويورك. يعتمد نمو هذه الخلايا على تحسين تقاناتها وعلى التوافر المتزايد للميثانول (Methanol) والهيدروجين، وهما الوقودان المستخدمان في خلايا الوقود في حقلي السيارات والإلكترونيات المحمولة. وبحلول عام 2006 يُتوقع أن تحقِّق منتجات جديدة تستخدم خلايا الوقود تحسُّناً في الأداء ومبيعاً بأعداد أكبر[1] (انظر الشكل 10 ـ 1).

إلا أن ثمة مسائل عديدة تتعلق بالأداء والتكلفة يجب حلها. تتوقع شركة أبحاث السوق المذكورة آنفاً أن تكون سوق خلايا الوقود في السيارات محدودة بصعوبات تقانية محضة، إضافة إلى اعتبارات التكلفة وصعوبات تأمين البنية التحتية، والافتقار إلى المعرفة الدقيقة بخيارات الوقود على المدى القصير.




**الشكل 10 ـ 1: خلية وقود.**

## الأنواع الرئيسة لخلايا الوقود وطرائق عملها

أدّى اختراع السيارة إلى تغيّرات جذريّة في نمط حياة الناس وفي الاقتصاد العالمي لم يكن أحد يتوقعها في ذلك الوقت. فالتوافر

المتزايد لوسائل النقل الرخيصة جعل العالم مكاناً سهل التنقل فيه، وأنتج بنية تحتية صناعية متطورة غيّرت شكل المجتمع الحديث.

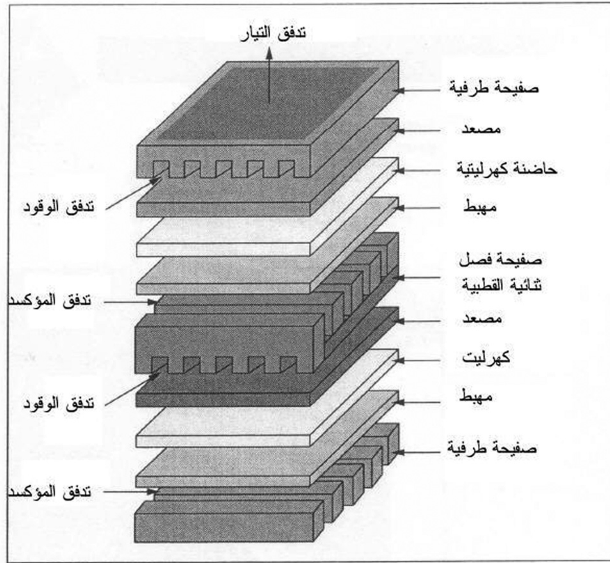
واليوم يمكن أن تحصل ثورة جديدة في عالم السيارات: سيارة وقودها هيدروجين عوضاً عن النفط. إن خلايا الوقود التي تشطر ذرّات الهيدروجين إلى بروتونات وإلكترونات، وتُدير محرّكات كهربائية من دون إصدار أي شيء أسوأ من بخار الماء، يمكن أن تجعل السيارة ودودة للبيئة. لا تصبح السيارات أنظف فحسب، بل تصبح أيضاً أكثر أماناً وراحة، مع مزيد من الخصوصية الشخصية، وربما أرخص سعراً. أكثر من هذا، يمكن للعربات التي تعمل بخلايا الوقود أن تكون مفيدة في تحريض الانتقال إلى اقتصاد الطاقة «الخضراء» التي تقوم على الهيدروجين. ومع حدوث ذلك، يمكن لإنتاج واستخدام الطاقة أن يتغيّر كثيراً. بذلك يمكن للسيارات والشاحنات التي تعمل بالهيدروجين أن تساعد على ضمان مستقبل يكون فيه الحراك الشخصي، أي حرية السفر إفرادياً، دائمة بلا حدود من دون الإضرار بالبيئة أو استنفاد موارد الأرض الطبيعية.

هناك مجموعة من العوامل المترابطة التي تجعل من التغيّر الكبير أشدّ احتمالاً. **أولاً**، وصلت محرّكات الاحتراق الداخلي التي تستخدم النفط، من حيث كمالها ووثوقيتها واقتصاديتها، إلى حدودها القصوى. فعلى الرغم من التحسين المستمر، لا يزيد مردود سيارات اليوم التي تستخدم تلك المحرّكات على 20 ـ 25 في المئة في تحويل محتوى الوقود من الطاقة إلى قدرة تحريك للسيارة. وبرغم أن صناعة السيارات الأميركية قد خفضت إصدارات العوادم إلى حد كبير مقارنةً بالإصدارات غير المقننة في ستينيات القرن العشرين (انخفضت الهيدروكربونات بمقدار 99 في المئة، وانخفض أول أُكسيد الكربون بمقدار 96 في المئة، وانخفضت أكاسيد النيتروجين بمقدار 95 في

المئة)، فإن الإصدار المستمر لغاز ثاني أُكسيد الكربون يسبّب قلقاً بسبب إمكان تغييره مناخ الأرض.

حتى مع تطبيق التقانات الجديدة، فإنه يُتوقَّع أن يستقر مردود محرّكات الاحتراق الداخلي التي تستخدم النفط عند نحو 30 في المئة، إضافة إلى أنه مهما حصل، فإنها سوف تستمر في إصدار ثاني أُكسيد الكربون. بالمقارنة، فإن مردود سيارة خلية وقود الهيدروجين يساوي ضعف ذلك المردود تقريباً، أي إنها سوف تحتاج إلى نصف طاقة الوقود. وأهم من ذلك، إن خلايا الوقود لا تُصدِر إلا بخار ماء وحرارة فقط. أخيراً، يمكن استخلاص الهيدروجين من أنواع مختلفة من مصادر الوقود والطاقة، ومنها الغاز الطبيعي والإيثانول (Ethanol) والماء (من خلال التحليل الكهربائي باستخدام الكهرباء)، وفي النهاية من نظم الطاقة المتجددة. بإدراك هذه الإمكانات، تبذل مجموعة من شركات السيارات المهمة مساعي مستمرة لتطوير عربات تعمل بخلايا الوقود، منها دايملر كرايسلر وفورد وجنرال موتورز وهوندا وبيجو ـ سيتروين ورينو ـ نيسان وتويوتا.

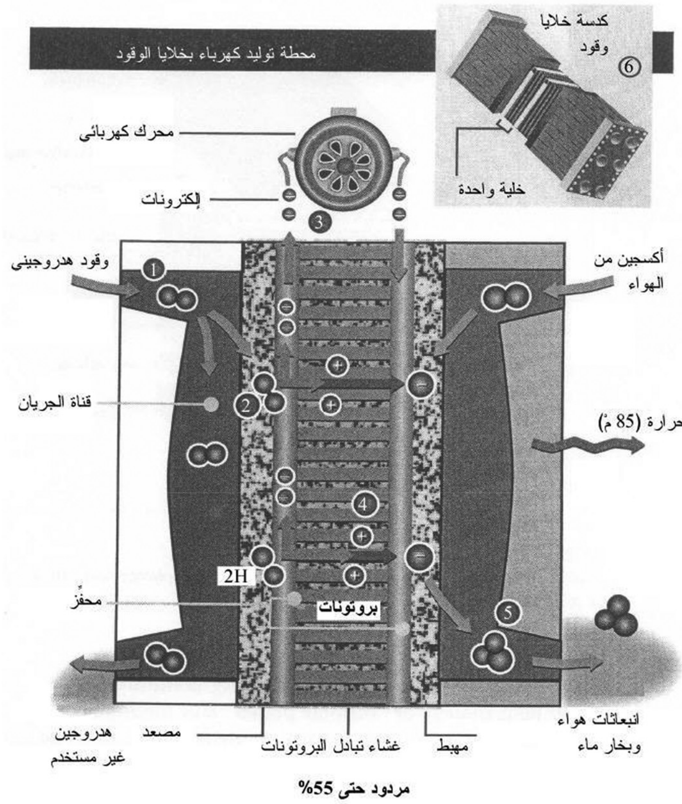
ثمة تقانات أساسية عدّة لخلايا الوقود، منها غشاء تبادل البروتونات (Proton Exchange Membrane)، وخلايا وقود الأُكسيد الصلب (Solid Oxide Fuel Cell)، والكربونات المصهورة (Molten Carbonate)، والقلويات، وحمض الفوسفور، وخلايا طاقة المعدن والهواء (زنك ـ هواء، ألمنيوم ـ هواء). والفارق الأساسي بين تلك الأنواع هو درجة الحرارة الناتجة التي تأخذ قيَماً تمتد من أقل من 100 مْ في حالة غشاء تبادل البروتونات، حتى 190 مْ في حالة حمض الفوسفور، و650 مْ في حالة الكربونات المصهورة، و1000 مْ في حالة الأُكسيد الصلب.




**الشكل 10 ـ 2: رسم توضيحي لغشاء مبادلة البروتونات. إن تعقيد التصميم وعدد الألواح الكبير يمثلان تحديات فريدة.**

## غشاء تبادل البروتونات

إن أكثر خلية وقود شيوعاً في صناعة السيارات هي خلية غشاء تبادل البروتونات (Proton Exchange Membrane) التي يبيّن الشكل 10 ـ 2 رسماً توضيحياً لها. تُفضَّل هذه الخلية بسبب عملها عند درجة حرارة منخفضة (أقل من 100 مْ) وعند ضغط منخفض (أقل من 0.69 ميغا باسكال). تُكدَّس عادة طبقات متناوبة من صفائح حقل التدفّق (Flow Field Plates) أو الصفائح المزدوجة القطبية (Bipolar Plates) والأغشية معاً لتكوين خلية الوقود. وتتألف الصفائح التي تحيط بمنطقة الغشاء النشطة من صفيحتين معدنيتين رقيقتين مبرّدتين داخلياً. يمكن أن تكون ثمة حاجة إلى عشرات، أو حتى مئات من تلك الصفائح والأغشية في كدسة خلايا الوقود الواحدة (انظر الشكل 10 ـ 3).




**الشكل 10 ـ 3: الكيمياء الكهربائية مقابل الاحتراق: تتكوَّن خلية وقود غشاء مبادلة البروتونات من قطبين رقيقين مساميين، هما المهبط والمصعد، يفصل بينهما غشاء بوليمري كهرليتي يسمح بالمرور للبروتونات فقط. ويغطي محفِّز أحد جانبي كل من القطبين. بعد دخول الهدروجين ❶ يفصله محفِّز المصعد إلى إلكترونات وبروتونات ❷. وتخرج الإلكترونات لتغذي محركاً كهربائياً ❸، في حين أن البروتونات تهاجر عبر الغشاء ❹ إلى المهبط. فيجمع محفِّز المهبط بين البروتونات والإلكترونات العائدة والأكسجين الآتي من الهواء لتكوين ماء .❺ ويُكدَّس كثير من الخلايا معاً لتوفير جهود كهربائية أكبر ❻[4].**

يجب إحكام إغلاق هذه الصفائح على طول حوافها لمنع تسرب الغاز. ويجب ألا يتقاطع غازا المصعد والمهبط، ويجب الإبقاء على معدّلات التسرّب منخفضة جداً. يعني هذا المتطلب أن ثمة مئات الإنشات من المساحات المُحكمة الإغلاق في الكدسة المتوسطة الحجم من خلايا الوقود. وتتفاقم مشكلة إحكام الإغلاق حين استخدام معادن تُختار على أساس مُعَامل التمدّد الحراري المنخفض أو المقاومة الكبيرة للتآكل، لا على أساس قابلية اللحام. لذا يمكن لتكاليف التصنيع أن تكون مرتفعة جداً بسبب إعادة التشغيل وإصلاح مواضع التسرّب.

لكن إذا بلغت خلايا الوقود التي من هذا النوع مرحلة النضج في صناعة السيارات، فإنه سوف تكون ثمة حاجة إلى إنتاج مئات الملايين منها في السنة. وهذا يمثّل تحدِّياً صناعياً يستحق التفكير به في مرحلة مبكرة. أما طرائق وصل أجزاء الخلايا معاً فيجب أن تُدرس وتُحدَّد فوراً بغية معالجة المكوِّنات.

أما مكوِّنات خلية الوقود التي يمكن أن تُصنع من اللّدائن فهي، وفقاً لقول الخبراء، الصفائح المزدوجة القطبية، والصفائح الطرفية، ومجمِّعات الصفائح، والأغطية، والمكوِّنات المحيطية المستخدمة في كُدُس خلايا الوقود. ويمكن صنع الصفائح من راتنجات حرارية التصليد، أو حرارية التلدُّن مع حشوات ناقلة كهربائياً ومانعات تسرّب مطّاطية السلوك تُكبس في مكانها أو تقوْلب فوقها أو تُرش عليها لتكوين مجموعة الصفيحة ومانع التسرّب[2][3].

ومن مكوّنات الخلايا الأخرى التقاطعات ومجمِّعات التيار وموازنات الماء وصفائح من اللّدائن ذات إبر وأنواع مختلفة من الأغشية:

- أغشية سيراميكية.
- أغشية زجاجية.
- أغشية حموض متعدّدة غير متجانسة (Hetropolyacid).
- أغشية ممعدنة سللوزية حيوية.

وبغية دفع تقانة أغشية تبادل البروتونات إلى الأمام، يجري تطوير سيرورات مختلفة لاستخدامها في صنع المكوِّنات. إن أعمال التطوير توحي بإمكان استخدام صفائح متكاملة مقولبة بالحقن، مصنوعة من بوليمر البولي كبريتيد الفينيلين الذي تصنعه الشركة Fortron، المقوّى بالزجاج الذي يمكن أن يحقّق خفضاً ملحوظاً في التكلفة والوزن في خلايا أغشية تبادل البروتونات. وبمكاملة الصفيحة الطرفية مع الصفيحة المجاورة العازلة في وحدة وظيفية واحدة، يمكن لبوليمر البولي كبريتيد الفينيلين أن يخفّض التكلفة والوزن بمقدار يصل حتى 90 في المئة، مقارنةً بنماذج خلايا الوقود الأولية الحالية.

## خلايا وقود الأُكسيد الصلب

### المبادئ الأساسية

تقوم خلايا وقود الأُكسيد الصلب (Solid Oxide Fuel Cells) على ملاحظة نرنست[*] (Nernst) قبل نحو قرن التي تنطوي على أن كهروليتات الحالة الصلبة تولِّد جهداً كهربائياً يساوي في حالة الدارة المفتوحة المقدار:

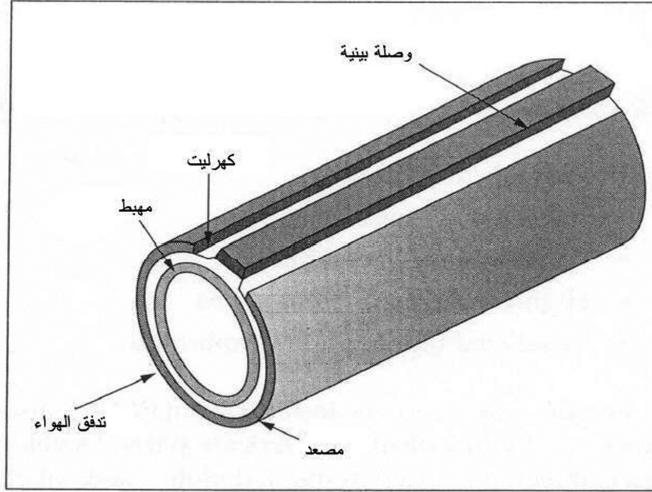
$$E\,\frac{RT}{4F} = \ln\left(\frac{PO_2(ox)}{PO_2(fu)}\right)$$

(*) الفيزيائي الكيميائي الألماني (Walter Hermann Nernst) (1864 ـ 1941 م).

حيث R ثابت الغاز المثالي، وT درجة حرارة الخلية، وF ثابت فاراداي، و$PO_2$ هو الضغط الجزئي لغاز الأُكسجين، وox تعني مؤكسِد، وfu تعني وقود. إن أكثر الكهروليتات استخداماً في خلايا الأُكسيد الصلب هو الزركونيا $ZrO_2$. يجب أن يكون الكهروليت تام الكثافة بحيث يمنع امتزاج غازَي المؤكسِد والوقود معاً، وإلا فإن الجهد المعطى بالمعادلة السابقة سوف ينخفض أو ينعدم. أما المصعد، الذي يُصنع عادة من مادة مركبة سيراميكية معدنية: النيكل ـ إيتريا ـ زركونيا، والمهبط، الذي يُصنع من الـ $LaMnO_3$ المشوب، فكلاهما مساميان بحيث يستطيع الوقود والمؤكسد التشرّد والتفاعل والتغلغل عبر سطح الكهروليت بسرعة والخروج منه، والتفاعل بحسب الحاجة. سوف تعتمد الناقلية ضمن الكهروليت على تركيز شواغر الأُكسجين التي تعتمد أيضاً على مستوى الإشابة وعلى درجة الحرارة.

تعمل خلايا الأُكسيد الصلب المصنوعة من الزركونيا عادة عند 1000 مْ. وتُشاب الزركونيا عادة بنحو 10 في المئة من الـ $Y_2O_3$ الذي يوفّر استقراراً للطَور التكعيبي ومقايضة جيدة بين التكلفة والناقلية. ولجعل مقاومة الخلية الداخلية أصغرية، يُجعل الكهروليت أرقّ ما أمكن (نحو 40 ـ 50 ميكروناً).

وتوصل خلايا الوقود المنفصلة، وتوضع معاً في كُدُس لتعطي الجهود الكهربائية والقدرة المطلوبتين. ويمكن وصل الخلايا المنفصلة تسلسلياً أو تفرعياً أو على نحو مختلط منهما. ويكون الوصل بين مصعد خلية ومهبط أخرى ضمن الكدسة في الوصل التسلسلي[5]. أما أكثر مواد الوصل شيوعاً في خلايا الأُكسيد الصلب الزركونية فهي الـ $LaCrO_3$ المشابة.



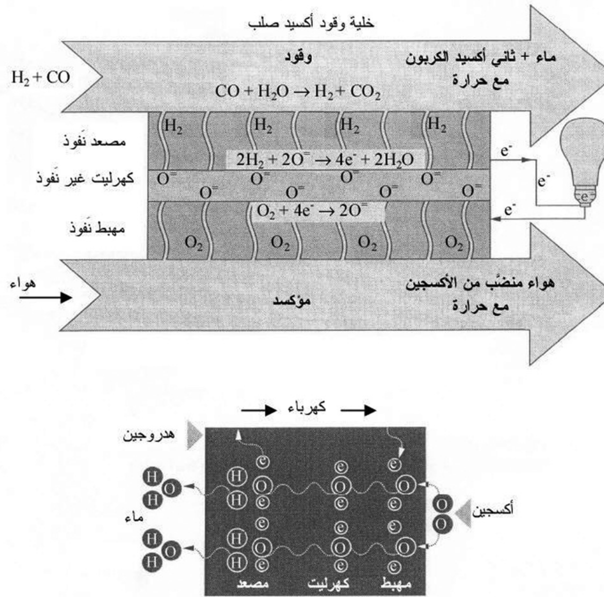

**الشكل 10 ـ 4: مخطط توضيحي لخلية وقود من الأكسيد الصلب. يحشد معهد إديسون للحام EWI عاملين وتجهيزات وموارد مخبرية لتلبية احتياجات مصنِّعي خلايا الوقود من مواد الوصل.**

هذا النوع من خلايا الأُكسيد الصلب موضح في الرسم المبسط في الشكل 10 ـ 4. ومن تشكيلات خلايا وقود الأُكسيد الصلب الأخرى ما يأتي:

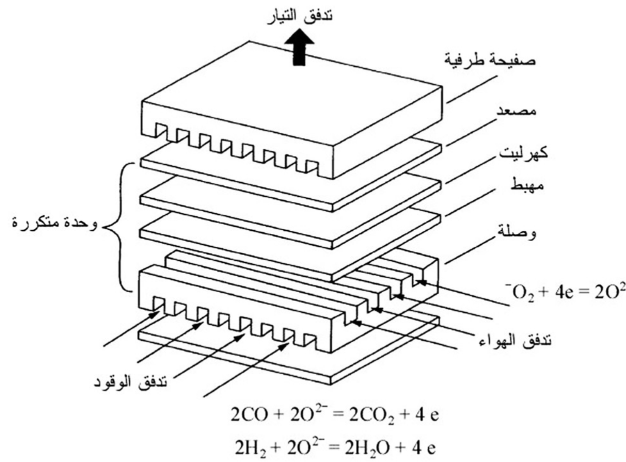
- الأنبوبية.
- الأنابيب السيراميكية المغلقة النهاية.
- التصميم ذو الصفيحة المسطّحة.
- الكتلية غير المجزأة.

تختلف خلايا وقود الأُكسيد الصلب تماماً عن خلايا غشاء تبادل البروتونات. فهي تعمل عند درجة حرارة عالية (أعلى من 800

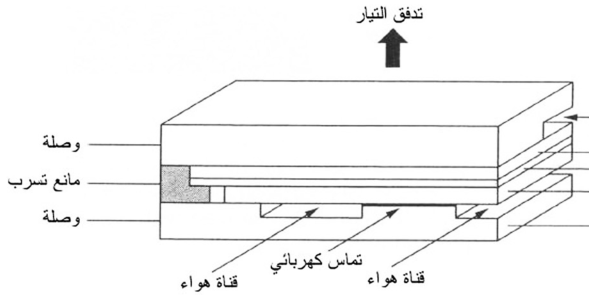
مْ)، ولذا فهي تُصنع من السيراميك والخلائط الفائقة التي تتحمل درجات الحرارة العالية. وهي تولِّد الكهرباء بتفاعل غازَيْ المؤكسد والوقود كهروكيميائياً عبر غشاء أُكسيدي ناقل للشوارد (الشكل 10 ـ 5). وبغية مراكمة جهد كهربائي مفيد، يوضع عدد من الخلايا (التي يتكوّن كل منها من مهبط موجب، وكهروليت، ومصعد سالب) في كدسة، وتوصّل تسلسلياً معاً بواسطة صفائح ثنائية القطبية تُعرف أيضاً بالوصلات البينية. إن التحدّي الكبير هو العثور على المادة الصحيحة لهذه الوصلات البينية[6].




**الشكل 10 ـ 5: خلية وقود الأُكسيد الصلب هي تجهيزة صلبة لتحويل طاقة وقود عادي إلى كهرباء. يمر هيدروجين الوقود فوق المصعد، ويمر أُكسجين الهواء فوق المهبط حيث يكتسب إلكترونات عند الملتقى مع الكهروليت. تمر شوارد الأُكسجين هذه عبر الكهروليت وتتفاعل مع الهيدروجين القادم من المصعد لتوليد كهرباء وماء وحرارة[6].**




**الشكل 10 ـ 6: يبين هذا المخطط طبقات خلية وقود الأكسيد الصلب**[6].




**الشكل 10 ـ 7: الوصلة البينية والوحدة المتكررة في كدسة مستوية يُتوقَّع أن تمثِّل تصميماً قوياً ميكانيكياً ذا كثافة طاقة عالية ومجدي التكلفة**[6].

يبيِّن الشكل 10 ـ 6 رسماً توضيحياً للوحدة المتكررة في كدسة مسطّحة يُتوقع أن تكون متينة ميكانيكياً، وأن تولد كثافة قدرة عالية، وأن تكون منخفضة التكلفة. تتعرَّض الوصلات البينية (انظر الشكل 10 ـ 7) في أثناء عملها في الكدسة في الوقت نفسه إلى جو مؤكسد في طرف المهبط، وإلى جو مُرجِع في طرف المصعد، وذلك طوال

آلاف الساعات من العمل عند درجات حرارة بين 700 و1000 مْ. والمؤكسد هو الهواء، أما المُرجع فهو وقود من قبيل الهيدروجين أو الغاز الطبيعي. ومن الظروف المتوقّع التعرُّض لها في كلتا الحالتين بخار الماء، إضافة إلى عدم نقاء الوقود المشوب بالكبريتيد.

يجب أن تكون الوصلات البينية مستقرة تجاه أي مادة إحكام تتماس معها خلال مئات الدورات الحرارية التي تحصل في أثناء العمل. ويجب أن تكون أيضاً متوافقة كيميائياً مع مواد التماس الكهربائي لتصغير مقاومة التماس، ومع مواد المساري. لذا يجب أن تمتلك مواد الوصلات البينية الخواص الآتية:

- **الاستقرار السطحي الجيد** (Good Surface Stability): يجب أن تكون مقاومة الوصلات البينية للأكسدة والتآكل عالية في كل من البيئتين المهبطية (المؤكسِدة) والمصعدية (المُرجِعة).
- **توافق التمدّد الحراري** (Thermal Expansion): يجب أن يكون عامل تمدّدها الحراري متوافقاً مع ذاك الذي للمصاعد والمهابط والكهروليتات والمواد المجاورة الأخرى التي تقع عوامل تمدّدها الحرارية جميعاً ضمن المجال من $10.5 \times 10^{-6}$ حتى نحو $12.0 \times 10^{-6}K^{-1}$.
- **الناقلية الكهربائية الجيدة** (High Elecrical Conductivity): يجب أن يتصف كل من مادة الوصلة البينية وقشرة الأُكسيد المشكَّلة محلياً بناقلية كهربائية جيدة.
- **الوثوقية وطول العمر** (Reliability and Durability): يجب أن تتوفّر الوثوقية والمقدرة المديدة على التحمُّل الميكانيكي والحراري في مادة الوصلة البينية وعند الملتقيات مع التماسات، عند درجات حرارة عمل خلية وقود الأُكسيد الصلب.
- **التوافق** (Compatibility): يجب أن يتوافر التوافق الجيد بين مادة الوصلة البينية ومواد موانع التسرّب والتماسات الكهربائية.

حتى قبل مدة قصيرة، كانت المادة المرشحة الأولى للوصلات البينية هي الـ $LaCrO_3$ المشوبة، وهي مادة سيراميكية تتحمل بسهولة درجة الحرارة الشائعة في هذه الخلايا التي تبلغ 1000 مْ. إلا أن مشاكل عدة منعت قبولها، منها ارتفاع تكاليف المواد الخام والتصنيع، وصعوبة إنتاج أجزاء كرومية عالية الكثافة عند درجات حرارة تلبيد معقولة، إضافة إلى أن نزوع الوصلة الكرومية إلى الإرجاع جزئياً عند الملتقى بينها وبين الوقود الغازي تؤدّي إلى التوائها، ومن ثَمَّ إلى تحطيم مانع التسرّب.

طبعاً، غدت هذه المشكلات أقلّ أهمية مع التوجه الأخير نحو تطوير تصاميم تعمل بدرجات حرارة أخفض. إن هذه التصاميم هي أيضاً خلايا ذات تكلفة مجدية اقتصادياً، وتستخدم كهروليتات تُحمَل على المصعد، سماكتها لا تتعدى بضعة الميكرونات، أو تحتوي على كهروليتات جديدة ذات ناقلية كهربائية أفضل. وهذه المواصفات تجعل من الممكن الاستعاضة عن الـ $LaCrO_3$ بمعادن صافية أو خلائط معدنية في الوصلات البينية. وتجعل المعادن وخلائطها، مقارنةً بالـ $LaCrO_3$ المشابة، تكاليف المواد الخام والتصنيع أخفض كثيراً.

في ما يتعلق بالخواص التي يجب أن تتصف بها الوصلات البينية في خلايا وقود الأُكسيد الصلب، فإن المواد التي يمكن استخدامها فيها هي الخلائط المقاومة للأكسدة والحرارة التي تبدي مقاومة شاملة للأكسدة عند درجات الحرارة المرتفعة. ومن الخلائط الفائقة موضع الاهتمام تلك القائمة على النيكل والحديد والكوبالت، والخلائط القائمة على الكروم، والفولاذات غير القابلة للصدأ. وجميع تلك الخلائط تحتوي على الكروم، أو الألمنيوم اللذين يوفّران مقاومة للأكسدة بتشكيلهما قشرة أُكسيدية من $Cr_2O_3$ أو $Al_2O_3$.

إذا كان الـ $Cr_2O_3$ هو الطَور المستمر المهيمن في القشرة الأُكسيدية، سمِّيَت الخليطة مُشكِّلة الكروميا، وإذا كان الـ $Al_2O_3$ هو الطَور المستمر المهيمن في القشرة الأُكسيدية، سمِّيَت الخليطة مُشكِّلة الألومينا. في حالة مُشكِّل الكروميا، يجب أن تكون ثمة نسبة كافية من الكروم في الخليطة لتكوين قشرة أُكسيدية مستمرة ولتحقيق مقاومة فاعلة للأكسدة. أما نسبة الألمنيوم فيجب أن تُضبط بحيث تكون عند أدنى قيمة ممكنة لها لدرء تشكُّل طبقة $Al_2O_3$ مستمرة يمكن أن تؤدّي دور العازل وأن تولد قشرة مقاومة كهربائية غير مقبولة في قشرة الكروميا نصف الناقلة.

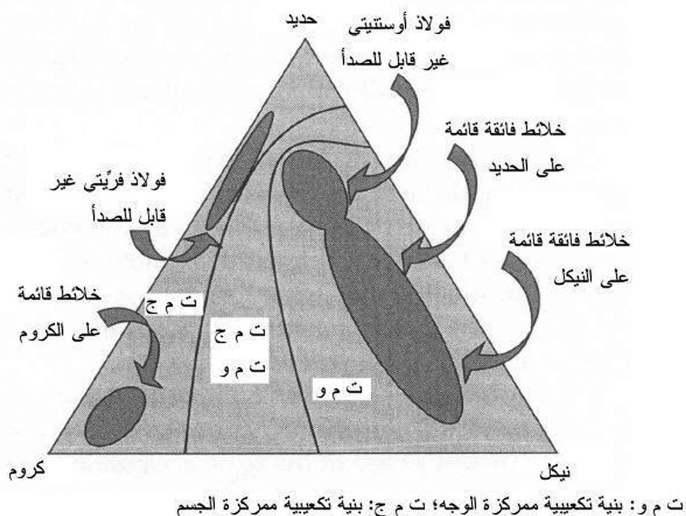
أما نسبة الكروم الدنيا التي يوصى بها في الخلائط الفائقة القائمة على النيكل والحديد، وفي الفولاذات غير القابلة للصدأ، فتساوي نحو 18 في المئةو، في حين أن النسبة المثلى تزيد على 20 في المئةو للحماية من التعرُّض الطويل لظروف التآكل الميدانية، ولدرء نضوب الكروم المحتمل من الحاضنة. وفي الخلائط الفائقة القائمة على الكوبالت، يجب اعتبار أن النسبة الوزنية 22 في المئة هي أدنى نسبة ممكنة.

ولجعل الناقلية الكهربائية للقشرة عظيمة، من المفيد أن تكون نسبة الألمنيوم أو السليكون أقل ما يمكن. تُضاف عادة كمية صغيرة (أقل من 1 في المئة) من الألمنيوم أو السليكون في كثير من التراكيب الخلائطية الشائعة لتحسين مقاومة الأكسدة والتآكل. وفي حالة الخلائط المشكِّلة للـ $Al_2O_3$، يجب ألا تقل نسبة الألمنيوم الوزنية عن 4 في المئة بغية تشكيل طبقة $Al_2O_3$ مستمرة من أجل الحماية المثالية.

**ت م و**: بنية تكعيبية ممركزة الوجه؛ **ت م ج**: بنية تكعيبية ممركزة الجسم

إن الخلائط الشائعة المُشَكِّلة للـ $Al_2O_3$، ومن أمثلتها خليطة

الشركة Fecralloy المقاومة للحرارة، تحتوي على نسبة وزنية من الألمنيوم في المجال من 4.5 حتى 5.5 في المئة، وتحتوي أيضاً على نسبة كبيرة من الكروم (أكثر من 15 في المئة) لدرء الأكسدة الداخلية والنضوب. وتُصنَّف التراكيب الخلائطية المعتادة التي تحقِّق معيار التركيب المذكور آنفاً (الخلائط القائمة على الكوبالت ليست من ضمنها) في عدة مجموعات موضحة في الشكل 10 ـ 8. وخواصها التي تُعتبر ذات أهمية لتطبيقات خلايا وقود الأُكسجين الصلب مبينة في الجدول 10 ـ 1.




**الشكل 10 ـ 8 هذه الخلائط في قيد النظر فيها لاستخدامها مادة للوصلات البينية في خلايا وقود الأكسيد الصلب**[6].

إن اختيار الخليطة الملائمة المقاومة للحرارة ذو صلة وثيقة بتصميم كدسة الخلايا موضع الاهتمام. ومن بين مجموعات الخلائط المختلفة، توفّر تراكيب الفولاذ الفرِّيتي غير القابل للصدأ، وتلك القائمة على الكروم، التي تتميز بأنها بُنى حاضنة تكعيبية ممركزة

الجسم، توافقاً من حيث التمدّد الحراري لخلايا الأُكسيد الصلب أفضل من ذاك الذي توفّره الخلائط الفائقة القائمة على النيكل والحديد والكوبالت والفولاذات العديمة الصدأ الأوستنيتية التي تتميز جميعاً ببنية حاضنة تكعيبية ممركزة الوجه.

يمكن للخلائط المشكِّلة للـ $Al_2O_3$ أن تكون ملائمة لتصاميم الكُدُس التي لا تنقل فيها مكوّنات الوصلات البينية الكهرباء، أو التي يمكن فيها إقصاء قشرة الـ $Al_2O_3$ العازلة من مسار الكهرباء. تتصف الخلائط المشكِّلة للـ $Al_2O_3$ باستقرار سطحي تجاه الأكسدة والتآكل أفضل من ذاك الذي في الخلائط المشكِّلة للـ $Cr_2O_3$، وهي توفّر أيضاً مقاومة ميكانيكية أعلى من تلك التي للبنى الفرِّيتية. على سبيل المثال، الخليطة Fecralloy تتصف عادة بمعدّل لنمو القشرة أخفض بمراتب كِبَر عدّة من ذاك الذي في مشكّلات $Cr_2O_3$، وبمقاومة خضوع يساوي 550 ميغا باسكال عند درجة حرارة الغرفة، مقارنةً بنحو 301 ميغا باسكال في خلائط الحديد ـ كروم الفرِّيتية.

انطلاقاً من هذه المزايا، حاول بعض مطورّي خلايا الأُكسيد الصلب إيجاد تطبيقات لكُدُس الخلايا التي تستخدم الخلائط المشكِّلة للـ $Al_2O_3$، خصوصاً تلك التي لها بنية فرِّيتية، ومن أمثلتها الخليطة Fecralloy، التي تتصف بعامل تمدّد حراري جيد التوافق مع مكوّنات خلايا الأُكسيد الصلب. على سبيل المثال، يمكن بناء الوصلة البينية من الـ Fecralloy بوصفها حاضنة تُكسى بعدئذٍ بمشكِّل $Cr_2O_3$ في منطقة التماس مع المهبط، وبذلك تنخفض مقاومة الملتقى بين الوصلة البينية والأقطاب. والخليطة Fecralloy ملائمة أيضاً للإطار الذي يعمل حاملاً لمكوّنات الخلايا في بعض كُدُس خلايا الأُكسيد الصلب.

**الجدول 10 ـ 1**: مقارنةً بين الخواص الأساسية لمجموعات الخلائط المختلفة لتطبيقات خلايا وقود الأُكسيد الصلب[6].

| الخليطة | بنية الحاضنة | عامل التمدّد الحراري × 10 $^{-6}$ كْ $^{-1}$ ضمن المجال: (درجة حرارة الغرفة ـ 800 مْ) | مقاومة الأكسدة | المقاومة الميكانيكية | قابلية التصنيع | التكلفة |
|---|---|---|---|---|---|---|
| خليطة قائمة على الكروم | تكعيبية ممركزة الجسم | 12.5–11.0 | جيدة | كبيرة | صعبة | عالية جداً |
| فولاذ غير قابل للصدأ فرِّيتي | تكعيبية ممركزة الجسم | 14.0–11.5 | جيدة | منخفضة | قابلة للتصنيع تقريباً | غير عالية |
| فولاذ غير قابل للصدأ أوستنيتي | تكعيبية ممركزة الوجه | 20.0–18.0 | جيدة | كبيرة إلى حد ما | قابلة للتصنيع | غير عالية |
| خليطة فائقة قائمة على الحديد | تكعيبية ممركزة الوجه | 20.0–15.0 | جيدة | كبيرة | قابلة للتصنيع | عالية إلى حد ما |
| خليطة فائقة قائمة على النيكل | تكعيبية ممركزة الوجه | 19.0–14.0 | جيدة | كبيرة | قابلة للتصنيع | عالية |

وفي برنامج تموله وكالة الفضاء الأميركية ناسا في مركز تكساس للناقلية الفائقة والمواد المتقدمة في جامعة هيوستون[7]، وجد الباحثون طريقة لبناء خلايا أُكسيد صلب تعمل عند درجة حرارة تساوي نصف تلك التي تعمل عندها التصاميم الحالية.

تعمل هذه التجهيزة عند 500 مْ، وهي درجة حرارة يأمل الباحثون أن تجعل هذا النوع من خلايا الوقود أرخص صنعاً وأسهل تغذية بالوقود بسبب إمكان إلغاء المواد الشاذة ونظم التبريد المعقّدة. وكان مفتاح هذا التقدم هو صنع نواة جديدة لخلية الوقود: صفيحة كهروليت تتحكّم بتدفّق الشوارد المشحونة كهربائياً من غشاء رقيق لا تزيد سماكته على 1 ميكرون. فترقيق الغشاء يخفض المقاومة الداخلية للتيار الكهربائي. يُصنع غشاء الكهروليت بالتنمية البلّورية الطبقية المنتظمة، أي بترسيب طبقات الذرّات واحدة تلو أخرى. ويمكن للغشاء الرقيق المطوَّر في جامعة هيوستون أن يعمل الآن بالميثانول أو البنزين، وبالهيدروجين حين توفّره.

بالمقارنة، فإن سماكة غشاء الكهروليت في خلايا الأُكسيد الصلب المتوافرة حالياً في الأسواق تساوي 100 ميكرون، وهذا التخفيض في السماكة يرافقه انخفاض في المقاومة الداخلية يمكّن من الحصول على قدرة خرج مماثلة عند درجة حرارة عمل أقل كثيراً.

لصنع هذه الطبقة الرقيقة جداً، لا يحتاج المرء إلى جلخ وكشط كتلة من المادة الكبيرة حتى الوصول إلى السماكة المرغوب فيها، بل يمكن تنمية الغشاء ذرّة تلو أخرى بالتنمية البلّورية الطبقية المنتظمة. تساوي سماكة الأغشية في خلايا الوقود هذه نحو 1000 ذرّة.

إن استجرار القدرة نفسها عند نصف درجة الحرارة يولّد مفعولاً مشابهاً لمفعول التداعي (Domino Effect) في تخفيض التكاليف. فأولاً، يمكن استخدام مواد لبناء الخلايا أرخص من السيراميكات العالية الكلفة التي تتحمل درجات الحرارة العالية، والفولاذات القوية

التي تتطلبها خلايا الـ 1000 مْ. ويمكن أيضاً للسيارات والإلكترونيات الشخصية، التي تُستخدم فيها خلايا الوقود هذه، أن تستغني عن المواد الشاذة ونظم التبريد المعقّدة، وهذا ما يخفض تكاليف تصنيعها. كل ذلك يضع مؤشرات الجدوى الاقتصادية لخلايا الوقود تلك في الاتجاه الصحيح.

لقد مولَّت الهيئة القومية الأميركية للمقاييس والتقانة NIST مشروعاً مدّته ثلاث سنوات لدى الشركة Technology Management Inc.، لتصميم نظام خلية وقود أُكسيد صلب تكاليفه معقولة، باستخدام مفهوم تعدّد المراحل للحصول على مردود عالٍ جداً لتحويل طاقة الوقود إلى كهرباء (70 في المئة) بقدرات تبدأ من 1 كيلو واط[8]. ويمكن ضم نظم عدّة من هذا النوع معاً للحصول على قدرة أكبر مع مزايا الأداء نفسها. إن الابتكار الأساسي في هذا المشروع هو بناء كُدُس أكسدة متدرّجة (Progressive Oxidation) تجعل المردود عظيماً بالاقتراب بالاستخدام الكهروكيميائي للوقود من 100 في المئة (مقارنةً بنحو 75 في المئة في النظم السابقة). أما الصعوبة الرئيسة في هذا العمل فهي استمثال الاستخدامية العالية للوقود عند جهد خلية عالٍ مع تكلفة مقبولة ووثوقية جيدة، وتطوير موانع تسرّب كبيرة تتحمل درجات الحرارة العالية لدرء التسرّب الذي يُضعف المردود. وبعد تطوير تلك الكُدُس، توضع ضمن إطار حامل بسيط نسبياً لتكوين نظام خلايا وقود منخفض التكلفة يمكن أن يخفض ثمن الكهرباء بنحو 20 في المئة، مقارنةً بالثمن المحدّد للنظم الحالية. يُضاف إلى ذلك أن الانبعاثات القليلة من النظام تجعله واحداً من أنظف تقانات توليد الطاقة الكهربائية القائمة على الوقود الإحفوري.

لقد وُضعت أخيراً محطة استعراضية لتوليد الكهرباء، قدرتها 250 كيلو واط، مصنوعة من خلايا وقود الأُكسيد الصلب، وتحتوي على أكثر من 600 كغ من النيكل (انظر الشكل 10 ـ 9). تتألف الخلية الواحدة

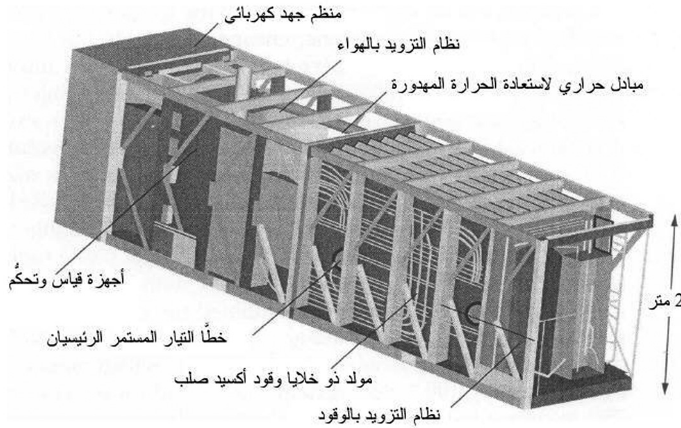
في هذه المحطة من أنبوب عمودي سيراميكي ذي نهاية سفلية مغلقة مكوَّن من طبقات متمركزة: مهبط داخلي، ومصعد خارجي، وكهروليت في الوسط. وتتكوّن الطبقات الثلاث من المواد التالية:

- مهبط من أُكسيد المنغنيز المشوب باللانثانوم $LaMnO_3$، على السطح الداخلي.
- كهروليت من الزركونيا المستقرة بالإيتريوم YSZ، في الوسط.
- مصعد معدني سيراميكي من النيكل والزركونيا المستقرة بالإيتريوم، في خارج الأنبوب.

يبلغ طول الخلية 1.7 متر، ويساوي قطرها الداخلي 2.2 متر. ويُحقن هواء المعالجة عبر أنبوب من الـ $Al_2O_3$ متمركز مع الخلية، وينساب نحو النهاية السفلى المغلقة،ثم يعود إلى الأعلى ضمن الفراغ الحلقي بين الأنبوبين في الشكل 10 ـ 9. ويتشرد الأُكسجين $O_2$ الموجود في الهواء في أثناء انسيابه على سطح المهبط الداخلي، وتمر شوارد الأُكسجين عبر طبقة الكهروليت الوسطى، وتتفاعل عند السطح المصعدي الخارجي مع الهيدروجين $H_2$ وأول أُكسيد الكربون CO ليعطيا الماء وثاني أُكسيد الكربون والكهرباء. يُولَّد الهيدروجين وأول أُكسيد الكربون من غاز طبيعي معالج، ويُدخلان إلى المحطة بوصفهما وقوداً، ويوجهان بحيث ينسابان على السطح الخارجي للأنبوب.

تولِّد الخلية الواحدة قدرة تساوي نحو 150 واط عند جهد يساوي 0.65 فولت. لذا، لبناء محطة تُنتِج عدة كيلواط، يجب وصل عدد كبير من الخلايا معاً في صفيفة من المجموعات، حيث تحتوي المجموعة على 24 خلية. ولتوليد 250 كيلو واط، تتألف كدسة الخلايا الكاملة من 2300 خلية مرتبة ضمن 96 مجموعة. وتوصل

جميع هذه الخلايا كهربائياً بواسطة وسائد من النيكل الكهروليتي، ويوصل خرج الكدسة بقضبان من النيكل من النوع N02200 إلى مخرج المولد المكوَّن من صفائح من الـ N02200 أيضاً.




**الشكل 10 ـ 9: رسم منظوري لمولّد بخلايا وقود الأكسيد الصلب قدرته 250 كيلو واط.**

بيَّنت الاختبارات أن تعديل التركيب الكيميائي يمكن أن يُحسِّن قوة ومتانة كهروليتات خلايا وقود الأُكسيد الصلب إزاء التصدّع. كانت الكهروليتات الصلبة تُصنع حتى الآن من الزركونيا المثبّتة بالإيتريوم الشديدة الناقلية لشوارد الأكسجين عند درجات الحرارة العالية، وفقاً لما تتطلبه خلايا الأُكسيد الصلب. إلا أن الزركونيا المثبّتة بالإيتريوم تتصف بمُعَامل تمدّد حراري كبير، وبمقاومة منخفضة للصدمة الحرارية، وبمتانة منخفضة إزاء التصدّع، وبمقاومة ميكانيكية منخفضة. وعلى وجه الخصوص، يمثّل افتقارها للقوة والمتانة مشكلة لتصنيع أغشية الكهروليت الرقيقة اللازمة للتطبيقات المتوقعة في مجالات الطيران والسيارات ومحطات توليد الطاقة الثابتة.

تتضمّن تعديلات التركيب الكيميائي التي تؤدّي إلى زيادة المقاومة والمتانة إزاء التصدّع إضافة الـ $Al_2O_3$ إلى الصيغة الأساسية للزركونيا المثبّتة بالإيتريوم. وقد جرى تطوير تقنيات لمعالجة مركبات الزركونيا وأُكسيد الألمنيوم تحتوي على ما تصل نسبته المولية حتى 30 في المئة من الـ $Al_2O_3$.

ووُجد أن اللوحات التي صُنعت بهذه التقنية كانت كثيفة وخالية من التصدّعات. أما أطوار المادة الوحيدة التي اكتُشفت في هذه المركَّبات فقد كانت الـ $ZrO_2$ و الـ $Al_2O_3$ التكعيبيّن. وهذا يعني أنه لم يحصل تفاعل كيميائي غير مرغوب فيه بين المكوّنات في أثناء المعالجة عند درجات الحرارة العالية.

لقد قيست مقاومة الثني والمتانة إزاء الكسر لمواد مركَّبة مختلفة من $ZrO_2$-$Al_2O_3$ في الهواء عند درجة حرارة الغرفة وعند درجة حرارة تساوي 1000 مْ (وهي درجة الحرارة التي تعمل عندها خلايا الأُكسيد الصلب عادة). وبيَّنت القياسات أن كلاً من مقاومة الثني والمتانة إزاء الكسر ازدادتا بزيادة نسبة أُكسيد الألمنيوم عند كلتا درجتي الحرارة. يُضاف إلى ذلك أنه قد وُجد أن معامل المرونة والناقلية الحرارية ازدادتا، وأن الكثافة قد انخفضت، مع زيادة نسبة أُكسيد الألمنيوم. ووُجد أن الناقلية الشاردية للأُكسجين عند 1000 مْ لم تتغيّر بإضافة أُكسيد الألمنيوم[9].

## خلايا وقود الكربونات المصهورة

تتكوَّن خلية وقود الكربونات المصهورة (Molten Carbonate Fuel Cell) (MCFC) في المحطة الثابتة من مصعد مصنوع من شريط نيكل مسامي، ومهبط مصنوع من شريط NiO، تفصل بينهما طبقة حاضنة قائمة على السيراميك. ويُسهِّل كهروليت من الكربونات،

الذي تُشرَّب به الحاضنة المسامية، التفاعل الكهروكيميائي بين المصعد والمهبط.

يُصنع شريط النيكل المستخدم في كل من المصعد والمهبط بتقنية تعدين المسحوق. يوزَّع معلّق طيني ثخين القوام، من مسحوق النيكل الميكروي الحُبيْبات، على نحو متجانس على سير متحرك يمر عبر فرن تلبيد وعبر ملفاف يَرُصّ ويزيد كثافة شريط المسحوق. تسمّى هذه السيرورة صبّ الشريط (Tape Casting). يُعتبر النيكل مادة مثالية لهذا الغرض، وهو أيضاً ناقل جيد للحرارة ومقاوم للتآكل. ولا يُستهلك في السيرورة.

تَدخُل مادة هيدروكربونية، من قبيل الغاز الطبيعي، خلية الوقود وتتفكّك كيميائياً بمحفز بحيث يغذي الهيدروجين المصعد، ويدخل الهواء (الأُكسجين) إلى المهبط. ويشطر التفاعل الوقود إلى شوارد موجبة وإلكترونات. وتتحرّك الإلكترونات من المصعد عبر قضيب نحاسي إلى الدارة الخارجية، في حين أن الشوارد الموجبة تتحرك عبر الكهروليت لتعطي غاز ثاني أُكسيد الكربون والماء. ويمكن التقاط الحرارة المتولدة (نحو 370 مْ) واستخدامها لأغراض أخرى.

تولِّد الخلية الواحدة مقداراً ضئيلاً من الكهرباء، وأبعادها تساوي 1.2 م × 0.7 م × 0.63 سم. إلا أنه بتكديس 350 ـ 400 خلية في وحدة متكاملة، يمكن الحصول على 250 كيلو واط من الكهرباء. ويمكن تجميع عدة وحدات معاً للحصول على 1 ـ 2 ميغا واط. إن مردود توليد الكهرباء بهذه الطريقة يساوي نحو 50 في المئة، ويمكن أن يصل حتى 80 في المئة باستخدام الناتج الحراري الثانوي لتوليد مزيد من الكهرباء.

## خلايا وقود حمض الفوسفور

إضافة إلى خلايا غشاء تبادل البروتونات، وخلايا الأُكسيد الصلب، وخلايا الكربونات المصهورة، ثمة خلايا وقود حمض الفوسفور (Phosphoric Acid Fuel Cell) (PAFC) التي يمثّل الكهروليتَ فيها حمضُ الفوسفور. يُظهر الجدول 10 ـ 2 خصائص كل طائفة من خلايا الوقود. نظراً إلى أن خلايا غشاء تبادل البروتونات تعمل عند درجة حرارة منخفضة، وإلى كونها صغيرة، وأنه يُعتقد أنها قابلة للتصنيع بتكاليف مقبولة، فإنها تمثّل أفضل خيار للاستخدام في السيارات.

قد يبدو من الجدول عند أول نظرة أن خلايا الأُكسيد الصلب لا تختلف كثيراً عن التقانات الأخرى المنافسة. ومع ذلك، فهي مديدة العمر جداً، وتتقبل طيفاً واسعاً من مواد الوقود، وأهم من ذلك، أنها تعمل عند درجة حرارة عالية. إن درجة حرارة العمل العالية تعني أن جميع الغازات التي تعبّر النظام سوف تخرج أكثر سخونة منها في التقانات المنافسة الأخرى. لذا، وباعتبار هذه الخلية المكوّن العالي درجة الحرارة في محطة توليد كهرباء مزدوجة التوليد، فإنها سوف تحقّق أعلى مردود لمولد كهربائي بخاري.

جرى أخيراً تطوير صفيحة ثنائية القطبية، مصنوعة من الفينوليك المغرفت المصلّد حرارياً، لاستخدامها في بيئة خلايا وقود غشاء تبادل البروتونات (عند 160 مْ) تعمل باستخدام حمض الفوسفور. تستطيع مادة الفينوليك تحمُّل درجة حرارة العمل تلك وبيئة حمض الفوسفور، في حين أن ينيل الإستر لا يستطيع ذلك.

**الجدول 10 ـ 2:** طوائف خلايا الوقود وخصائصها[5].

| | خلايا وقود حمض الفوسفور | خلايا وقود الكربونات المصهورة | خلايا وقود غشاء تبادل البروتونات | خلايا وقود الأكسيد الصلب |
|---|---|---|---|---|
| درجة حرارة العمل (مْ) | 190 | 650 | 80 | 1000 |
| الوقود | $H_2$، $R^*$ | $H_2$، $R^*$، CO | $H_2$، $R^*$ | $H_2$، $R^*$، $CH_4$، CO |
| التفكيك الداخلي | غير موجود | موجود | غير موجود | موجود |
| المردود (عند أعلى حرارة) | 40 ـ 50 في المئة | 50 ـ 60 في المئة | 49 ـ 50 في المئة | 45 ـ 55 في المئة |

$R^*$: هيدروكربونات معادة التشكيل: مفككة ومعالجة لإغنائها بالهيدروجين

## خلايا وقود أخرى

جرى تطوير تجريبي لخلايا طاقة كهربائية من المعدن والهواء باستخدام الزنك والهواء والألمنيوم والهواء. فقد اكتشف الباحثون في جامعة ماسَّاشوستس في أمهرست[10] متعضياً ميكروياً، (Rhodoferax ferrireducens)، قادراً على توليد مستقر مديد للكهرباء بأكسدة الكربوهيدرات. ينقل هذا المتعضي الإلكترونات مباشرة إلى قطب في أثناء استقلابه السكّر، محوّلاً إياه إلى كهرباء، ومُنتِجاً غاز ثاني أُكسيد الكربون كناتج ثانوي.

يقول ديريك لافلي (Derek Lovley): «في الماضي كانت خلايا الوقود الجرثومية تحوِّل 10 في المئة أو أقل من الإلكترونات المتوافرة، أما نحن فوصلنا بها إلى أكثر من 80 في المئة. وتطلبت المحاولات السابقة لتحويل الكربوهيدرات إلى كهرباء مكوكاً، أو وسيطاً، للإلكترونات ساماً للإنسان عادةً. أما هذا المتعضي، فلا يحتاج إلى وسيط لأنه يلتصق مباشرة بسطح القطب».

ويتابع: «هذا واحد من التطوّرات الكبرى. لقد صنعها الناس

من دون وسيط من قبل، إلا أن استخلاصهم للطاقة كان أقل من 1 في المئة. وعدم الحاجة إلى استخدام وسيط سام يمثّل مزية جلية في توليد الكهرباء. وفي النهاية، تُنقل الإلكترونات التي في خلية الوقود إلى الـ $O_2$، أي إن ما نفعله هو وضع سلك بين المتعضّي والأُكسجين وحصد هذا التيار من الإلكترونات التي إذا لم نفعل ذلك تذهب إلى الأُكسجين مباشرة».

ونظراً إلى أن السكريات تمثّل مكوّناً أساسياً لكثير من أنواع الفضلات والمحاصيل الغنية بالكربوهيدرات، فإنها يمكن أن تصبح بديلاً اقتصادياً للوقود الإحفوري في إنتاج الكهرباء. نظرياً، يمكن لهذه الطريقة أن تجعل كوباً من السكر يغذي مصباحاً قدرته 60 واط مدة 17 ساعة. طبعاً، تحتاج هذه التجهيزة إلى تحسين قبل التمكُّن من تسويقها تجارياً.

وفي استقصاء آخر[11]، أعلن الباحثون في قسم الكيمياء في جامعة أكسفورد، خبر خلية وقود تقوم على محفِّزات كيميائية تأتي من إنزيمات موجودة في البيئة الطبيعية. وتتفوق المحفزات الإنزيمية تلك على المحفزات البلاتينية المستخدمة حالياً في خلايا الوقود التي تولد الكهرباء من الهيدروجين والأُكسجين. ويُؤمَل أن يؤدّي اختراع خلية الوقود الحيوية إلى إنتاج للطاقة رخيص ونظيف ومنيع في التطبيقات المنزلية المتوسطة الحجم.

يقول الأستاذ فريزر آرمسترونغ (Fraser Armstrong): «إن هذه التقانة قابلة للتطوير إلى حد بعيد، ومع ذلك ما زلنا في بداية الطريق، وما زال ثمة الكثير الذي يجب فعله قبل أن تصبح خلايا الوقود هذه القائمة على الإنزيمات متوافرة تجارياً».

من أمثلة مواد الكهروليتات الغشائية التي في قيد التطوير

لاستخدامها في خلايا الميثانول/ هواء والهيدروجين/ هواء مادة مركَّبة من **(1)** بوليمر قابل للمعالجة مصهوراً (خصوصاً، البولي فلوريد الفينيليدين (Polyvinylidene Fluoride) (PVDF) و**(2)** ناقل بروتونات صلب (خصوصاً كبريتات السيزيوم الحامضية). مقارنةً بمواد أغشية الكهروليت المختبرة سابقاً، تتصف هذه المواد بمزايا الأداء الجيد والتكلفة المنخفضة والملاءمة لتصنيع خلايا الوقود.

ثمة عقبة أساسية في وجه استخدام مواد الأغشية الكهروليتية المختبَرة الأخرى، هي أنه يجب ـ إماهتها كي تصبح قادرة على نقل البروتونات. ويُترجَم هذا المتطلب إلى درجة حرارة عمل عظمى مسموح بها تساوي نحو 90مْ، إضافة إلى أن وجود الماء في الحاضنات البوليمرية يؤدّي على نحو غير مرغوب فيه إلى نفاذية أشدّ للميثانول. لكن المرغوب فيه هو تخفيض نفاذية الميثانول لتحسين أداء الخلية وزيادة مردود استخدام الوقود، وتشغيل خلايا الوقود عند درجات حرارة تصل إلى 140 مْ لزيادة تحمُّلها لأول أُكسيد الكربون الناجم عن تيارات الوقود المعالج. لذا فإن المطلوب هي مواد أغشية تنقل البروتونات من دون وجود الماء.

في المادة المركَّبة، التي هي من النوع الموجود قيد التطوير، يعمل البوليمر حاضنة تحمل ناقل البروتونات الصلب. وفي حالة كبريتات السيزيوم الحامضية، يحصل نقل البروتونات بآلية لا تعتمد على الماء. عند درجة حرارة الغرفة، تكون البروتونات في حالة ارتباط، ولذا تكون ناقلية البروتونات صغيرة أو معدومة. وعندما تزيد درجة الحرارة على 130 مْ وتصل إلى درجة في المجال 135 ـ 140مْ، يتعرض كبريتات السيزيوم الحامضية إلى انتقال طَوري إلى حالة تمتلك فيها شوارد الهيدروجين مقداراً جيداً من القدرة على الحركة، أي إن المادة تصبح ناقلة للبروتونات، ويمكن للناقلية

النوعية أن تصل حتى 0.1 سيمنس/سم، وهي من رتبة ناقليات مواد أغشية كهروليتية اختُبرت سابقاً. يمكن استخدام هذه الأغشية لصنع مجموعات أغشية كهروليتية لاختبار خلايا الوقود في المستقبل[12].

أخيراً، تُعدُّ خلايا وقود كهروليت البوليمر واعدة كمصدر طاقة للتطبيقات التجارية، إلا أن ثمة مشاكل تتعلق بوقودها. فأفضل أداء لها يكون حين استخدام الهيدروجين وقوداً، إلا أن الهيدروجين غالٍ وصعب النقل والخزن. يمكن استخدام وقود أكثر وفرة عملياً من قبيل البنزين أو الميثان (الغاز الطبيعي)، لكن فقط حين استخدام معالج للوقود لتحويله إلى تيار غازي غني بالهيدروجين. لكن هذه المعالجة مُكلِفة ويجب أن تتضمّن مرحلة تنظيف لإزالة منتجات التفاعل الثانوية (خصوصاً أول أُكسيد الكربون) التي تُفسد المحفّز البلاتيني. وأحد حلول هذه المشكلة هو تصميم غشاء مطلي بمحفِّز أشدّ تحمُّلاً لغاز أول أُكسيد الكربون. حينئذٍ لا يحتاج المعالج إلى مرحلة تخلّص من أول أُكسيد الكربون، ويمكن أن يُجعل صغيراً بتكلفة أقل كثيراً. وقد اقتَرحت عدة شركات تطوير مادة جديدة تتحمل الحرارة العالية لاستخدامها في الأغشية المطلية بالمحفّز، وسيرورة تصنيع مستمرة جديدة لإنتاج الأغشية ومجموعات الأقطاب بكميات كبيرة وتكلفة منخفضة. يعمل أحد الأغشية المقترحة المطلية بالمحفز عند درجة حرارة أعلى من تلك التي تعمل عندها النظم الحالية (أعلى من 100 مْ)، ويُستخدم فيه مقدار قليل من البلاتين، ويتحمل مستويات من أول أُكسيد الكربون تزيد بألف مرة على ما تتحمله خلايا وقود كهروليت البوليمر الحالية. يُضاف إلى ذلك، أنها تحتاج إلى نظام إدارة ماء أبسط كثيراً، وذلك خلافاً لأغشية خلايا الوقود المعتادة التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة. وثمة طرائق جديدة قيد التطوير لصنع أغشية مطلية بمحفّز لتطبيقات توليد الطاقة المحمولة ولمصادر

الطاقة الثابتة، ومن تلك الطرائق سيرورة توضيع البخار كيميائياً المدعومة بالهباب لتوضيع أغشية بلاتين شديدة المسامية ورقيقة جداً على الأقطاب.

وكُشف أخيراً عن نموذج أولي لخلية وقود ميثانول مباشر لتغذية مشغلات الموسيقى الرقمية والمجموعات الرأسية اللاسلكية الخاصة بالهواتف الخلوية. تولِّد الخلية الجديدة قدرة مقدارها 100 ملي واط، ويساوي وزنها 8.5 غرام، وتستطيع تغذية مشغِّل موسيقى MP3 مدة 20 ساعة بشحنة عالية التركيز من الميثانول يساوي حجمها 2 سم$^3$.

## تطبيقات خلايا الوقود في مجال النقل

ليست خلايا الوقود جديدة. فروّاد الفضاء يستخدمونها على متن المركبات الفضائية منذ ستينيات القرن العشرين. ولعلها سوف تصبح قريباً شائعة على الأرض أيضاً لتغذّي السيارات والشاحنات والحواسيب المحمولة والهواتف الخلوية وغيرها.

ونظراً إلى أن خلايا الوقود تُنتِج كثيراً من الكهرباء مع إصدار الماء النقي فقط كناتج ثانوي، فإنها على درجة من النظافة سمحت لروّاد الفضاء فعلاً بشرب الماء الناتج منها في المكّوك الفضائي.

وفي السنوات الأخيرة، أصبح الاهتمام بإيصال هذه التقانة الودودة للبيئة إلى السوق كبيراً جداً. إلا أن ثمة مشكلات: فأنت لا تستطيع تعبئة الهيدروجين من محطة الوقود القريبة منك، إضافة إلى أن السيارات والحواسيب القائمة على خلايا الوقود ما زالت مكلفة نسبياً. لقد جعلت هاتان المشكلتان استخدام خلايا الوقود يقتصر على عدد صغير من سيارات العرض، وعلى بعض الاستخدامات

التخصّصية، ومن أمثلتها توليد الطاقة على المكّوك الفضائي وتأمين طاقة احتياطية للمستشفيات والمطارات.

لكن الأموال الحكومية المخصّصة للبحوث ساعدت على معالجة وتجاوز تينك العقبتين على أمل صنع أنواع مختلفة من خلايا الوقود أرخص صنعاً وأسهل تزويداً بالوقود. إلا أننا ما زلنا في حاجة إلى بنية تحتية للتزويد بالهيدروجين، والتشريعات التي تسمح باستخدامه في شتى أنحاء البلاد قيد الدراسة حالياً.

**السيارات**

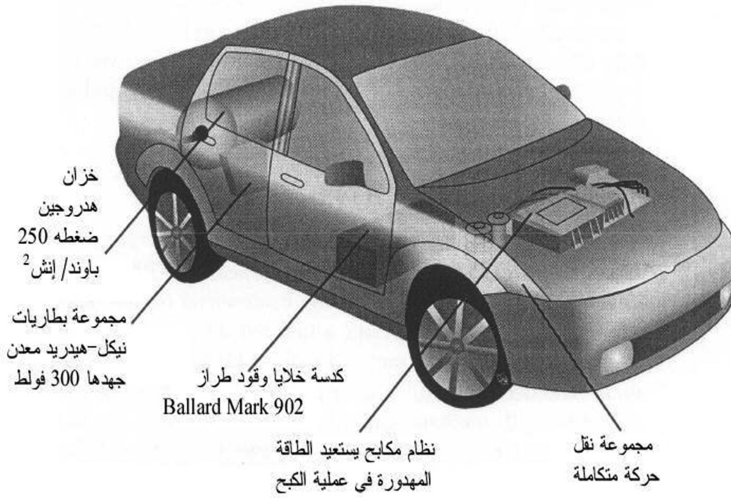
تمتلك جميع الشركات الرئيسة والكبيرة في العالم، التي تصنِّع السيارات، برامج لتطوير عربات تستخدم خلايا الوقود، لكن هذه العربات ما زالت في مرحلة تجريبية أو استعراضية، أو في مرحلة النموذج الإنتاجي.

سوف تتجول قريباً سيارات تعمل بالهيدروجين من طراز فورد فوكَس (Ford Focus) في شوارع فانكوفر. إنها جزء من برنامج تطوير تعاوني مدته ثلاث سنوات لاختبار عربات خلايا الوقود على أرض الواقع.

يُستخدم في هذه العربة محرّك خلية وقود طراز (Ballard) كندي الصنع، مع خزان هيدروجين مضغوط من شركة Dynetek (انظر الشكل 10 ـ 10). وثمة أيضاً نظام لاستعادة الطاقة الحرارية المبددة في عملية الفرملة، وبطارية متطورة لخزن الطاقة مصنوعة من نيكل ـ هيدريد معدن.

وأنتج أحد المصنِّعين نظام خلية وقود وُضع خزان وقوده في مركز العربة، وهذا ما مكَّن من تخفيض ارتفاع جسمها حتى 1.25 متر، في حين أن مصنِّع آخر صنع سيارة خدمة ضمن المدينة تضم بطارية شوارد الليثيوم مع كدسة خلايا وقود طوّرتها مؤخراً شركة

نيسان. وصممت الشركة جيب وصنعت سيارة خلايا وقود لثلاثة أشخاص تُستخدم فيها تقانة Drive-by-Wire التحكّم الإلكتروميكانيكي بالعربة. ولدى شركة سوزوكي عربة لستة ركاب يُستخدم فيها أيضاً التحكّم الإلكتروميكانيكي بالعربة.




**الشكل 10 ـ 10: سيارة خلايا وقود اختبارية**

وطوَّرت شركة يابانية كدسة خلايا وقود مرصوصة من الجيل القادم تحقّق أداء أفضل مع زيادة في المسافة ومردود الوقود، وهي مصمّمة للعمل عند درجات حرارة منخفضة تصل حتى ـ 20 مْ. إن العمل في الجو البارد هو أحد أهم العوائق التقنية للتطبيقات الواسعة النطاق لتقانة خلايا الوقود. وتهدف شركة جنرال موتورز إلى بيع مليون وحدة من عرباتها التي تعمل بخلايا الوقود بحلول عام 2020، وفقاً لما قاله إداريّو الشركة.

## الدراجات الآلية وقوارب الخدمة

طوَّرت شركة ياماها[13] خلية وقود للدراجات الآلية، وأصبحت بذلك أول مُنتِج رئيس للدراجات الآلية يصنع تجهيزة من هذا النوع. وقود هذه الخلية هو الميثانول، أما مقاسها فهو 40 سم$^2$.

وتقوم شركة ياماها[13] أيضاً بتطوير خلايا وقود للدراجات الآلية الصغيرة من فئة الـ 50 سم$^3$. وقد وصلت سرعة الدراجة إلى 40 كيلو متر في الساعة بقدرة تساوي 500 واط، وهذا أداء مكافئ لأداء دراجة مماثلة من الدراجات الشائعة.

ويخضع قارب خدمة تُستعمل فيه خلايا الوقود الكهربائية التي تُغذى بالهيدروجين لاختبارات ميدانية ناجحة في كاليفورنيا. فقد رُكِّب نظام خلايا الوقود في القارب Duffy الذي يُقلّ 22 راكباً، الذي سوف يكون في خدمة العموم مدة 10 ـ 12 ساعة يومياً.

## القاطرات والغواصات والعبارات واليخوت

يقوم مركز الآليات الوطني التابع للجيش الأميركي (U. S. Army National Automotive[14] (NAC) بتمويل مجموعة دولية لتطوير واختبار قاطرة قدرتها 1 ميغا واط تعمل بخلايا الوقود، وذلك لتطبيقات القطارات العسكرية والمدنية.

وفي مشروع آخر في نيفادا، استُكمل بنجاح اختبار قاطرة مناجم تعمل بخلايا الوقود، وسوف تستمر القاطرة في الخدمة التجريبية لمزيد من التقييم. وثمة برنامج مواز آخر[15] هو تشغيل مرافق منجم فحم بغاز الميثان، حيث كان الغرض من المشروع تبيان جدوى ومزايا الميثان المستخرج من مناجم الفحم في توليد الكهرباء النظيف والعالي المردود.

وكشفت أكبر شركة ألمانية لصناعة السفن[16] (Howaldtswerke Deutshe Werft)، النقاب عما أسمته أول غواصة في العالم تُحرَّك بتقانة خلايا الوقود. فقد انطلقت هذه الغواصة، وهي الأولى من بين أربع غواصات من طراز 212A التي تصنعها الشركة لمصلحة الأسطول الألماني، من حوض بناء السفن التابع للشركة لاختبارها في بحر البلطيق. يُستخدم في هذه الغواصة الهيدروجين وقوداً للخلية، ويُتوقع أن يحصل التقييم تحت عمق الماء. وقد صُمِّمت هذه التقانة لتخفيض الضجيج والمخلّفات الثانوية.

وأخذ الأسطول اليوناني وحدات خلايا وقود أغشية تبادل البروتونات لمكاملتها مع نظم الدفع الموجودة في ثلاث غواصات من الفئة 209 بغرض المساعدة على زيادة مدى الغواصة تحت الماء ليساوي مدى الغواصات الجديدة.

وجرى عرض سلسلة من الاختبارات والبيانات لتحديد استجابة نظام خلايا وقود لمحاكيات أحمال قدرة بحرية. وقد بيّنت الاختبارات أن النظام يحقق جميع القواعد التي تنطبق على مولّدات التيار المستمر والمتناوب الدوّارة. وقد أُجري هذا العمل لمصلحة سلطة النقل المائي في منطقة خليج سان فرانسيسكو[17] الناشطة في تطوير عبّارة تُحرِّكها خلايا الوقود سوف تُستخدم بين البر وجزيرة (Treasure Island) بكاليفورنيا. أخيراً، ثمة يخت طوله 12 متراً يعمل في ألمانيا بنظام دفع يستخدم خلايا وقود أغشية تبادل البروتونات.

### الحافلات والشاحنات

تبيع شركة تصنيع يابانية شاحنات صغيرة عديمة الانبعاثات وتعمل بالهيدروجين ومزوّدة بمحرّك هجين يُغذّى من بطارية وخلية

وقود. وقد عدَّلت شركة نيسان الشاحنة المسماة Clean Urban لتعمل بخلايا غشاء تبادل البروتونات بقدرة 6 كيلو واط. تتسارع هذه الشاحنة من الصفر حتى نحو 100 كم/ساعة خلال 10 ثوان، وتستطيع الوصول إلى سرعة تصل إلى 120 كم/ساعة، وتقطع مسافة تساوي 400 كم ضمن بيئة مدينية. صحيحٌ أن هذا المدى مشابه لمدى الشاحنات الشائعة، إلا أن مدى الشاحنة الجديدة سوف يُحدَّد بنحو 100 كم على الطرقات السريعة بغية إبقاء سعرها أقل من 100 ألف دولار[18].

وكشف مركز الآليات القومي التابع للجيش الأميركي أخيراً عن الشاحنة Freightliner، وهي شاحنة مزوّدة بوحدة طاقة احتياطية مكوّنة من خلايا وقود تستخدم الميثانول[19]. إن وحدة الطاقة الاحتياطية هذه، التي تساوي قدرتها 5 كيلو واط، التي تحتوي على كدسة من خلايا الوقود، سوف تولِّد الكهرباء لتغذّي العربة العسكرية والتجهيزات المحمولة عليها، ومنها الحواسيب وصحون هوائيات الاتصالات الفضائية، ونظام خرائط ثلاثي الأبعاد.

وكشفت شركة جنرال موتورز والجيش الأميركي النقاب عن شاحنة عسكرية هجينة تعمل بالديزل ومزوّدة بوحدة طاقة احتياطية مكوّنة من خلايا وقود قدرتها 5 كيلو واط، مع محلِّل كهروكيميائي، من تصميم وصنع شركة Hydrogenics[20]. يستخدم المحلل الكهروكيميائي في أثناء سير الشاحنة، الكهرباء التي يولدها محرّك الديزل لتجزئة الماء إلى هيدروجين وأُكسجين، ويُخزّن الهيدروجين للاستخدام لاحقاً. في أثناء تشغيل خلية الوقود لتوليد الكهرباء، يُؤخذ الماء الذي يمثّل الناتج الثانوي ويُخزّن لاستخدامه حين تكرار الدورة.

وكانت شركة دايملر كرايسلر[21][22] سبّاقة في مشروع اختبار خلايا وقود في 30 حافلة ميدانية من أسطول العربات الكهربائية التي

تغذّيها تقانة خلايا الوقود التي هي من حيث المبدأ العملية العكسية للتحليل المائي. في خلايا الوقود، يتفاعل الأُكسجين الموجود في المحيط مع الهيدروجين (المخزون كغاز مضغوط) فيُنتجا كهرباء وماء وقليلاً من الحرارة فقط، وهذا ما يحقِّق الهدف الذي وضعته كاليفورنيا بخصوص انعدام انبعاثات الدخان وغازات الدفيئة.

لقد غدت هذه الحافلة، التي تغذّيها خلايا وقود قدرتها 75 كيلو واط، وتصنعها شركة UTC، أول حافلة خلايا وقود هجينة سوف تدخل خدمة الركاب في كاليفورنيا، حيث سوف تقطع يومياً نحو 160 كم[23][24]. وزُوِّدت حافلات مرسيدس بنز بمحرّكات خلايا وقود قوية، وهي سوف تُستخدم ضمن نظام النقل العام في برث في غرب أستراليا[25].

وبدأت سلطة النقل في أمستردام بتشغيل حافلات الهيدروجين على خطين في المدينة. تستخلص الحافلة الهيدروجين من تسعة خزّانات مركَّبة على سطحها، وكل خزان قادر على تزويدها بوقود يكفي لسيرها مسافة تساوي 250 كم[25]. وثمة حافلة قيد الاختبار في ولاية نيويورك تُستخدم فيها خلايا وقود الهواء والزنك العديمة الانبعاثات. وتقوم أيضاً سلطة قطارات الأنفاق في واشنطن باختبار حافلة تستخدم خلايا وقود الميثانول.

### وحدات الطاقة الاحتياطية[26].

ضُمَّت وحدات الطاقة الاحتياطية القائمة على خلايا الوقود إلى تقانة التفكيك وإلى نظم تنقية الهيدروجين للتمكين من استخدام نظم خزن وقود البروبان أو الميثانول. ومن تطبيقات ذلك تأمين الطاقة الاحتياطية للعربات الترفيهية والسفن والشاحنات الثقيلة.

وأخذت إدارة التسليح والمركبات في الجيش الأميركي[27] وحدة طاقة احتياطية قائمة على خلية وقود ذات محلل كهروكيميائي

لاختبارها ونشرها في عربات الجيش. يقوم المحلل الكهروكيميائي في الوحدة بإعادة شحنها بالهيدروجين في أثناء عمل محرّك العربة. وهذا الوقود الهيدروجيني يكفي لتشغيل وحدة الطاقة الاحتياطية القائمة على خلايا الوقود مدة خمس ساعات بقدرة وسطى تساوي 3 كيلو واط، ويمكنها أن تُعطي قدرة قصوى مقدارها 5 كيلو واط.

## التطبيقات في القطاع التجاري

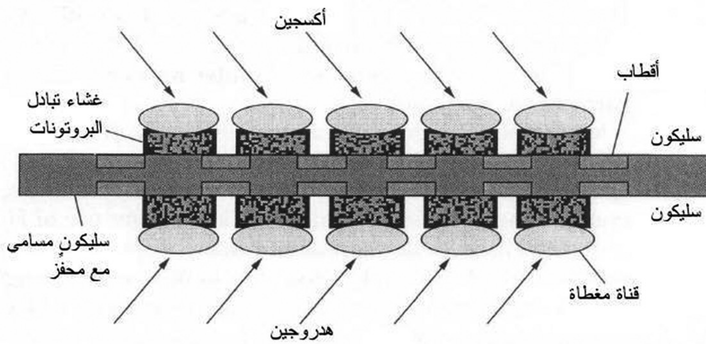
### الهواتف الخلوية والحواسيب

تخطّط أكبر شركة اتصالات لاسلكية في اليابان لطرح هواتف خلوية تغذيها خلايا وقود صغيرة تعمل بالهيدروجين أو الميثانول. وسوف تظهر تلك الخلايا أيضاً على شكل قطع مرتفعة الثمن تُضاف إلى الحواسيب المحمولة المتطوّرة.

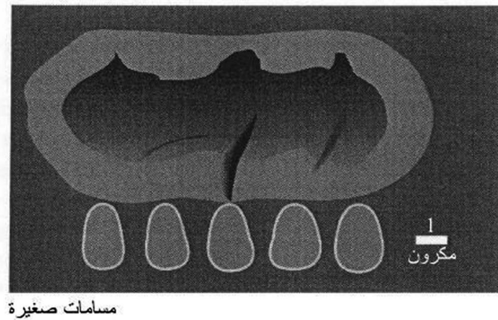
وتقوم شركة صناعة رقاقات سليكونية في جنيف بسويسرا بتطوير خلايا وقود ضئيلة للهواتف الخلوية يمكن إعادة تعبئتها بالوقود وفق الحاجة. تبني الشركة دوافعها إلى هذا التطوير على حقيقة أن الهاتف يستهلك تيّاراً شدّته 300 ملي أمبير عند جهد مقداره 3.6 فولت، وأن الحَيّز المتاح فيه لمصدر الطاقة لا يمكن أن يزيد على 12 سم$^3$. لكن تيار خرج خلية الوقود مرتبط مباشرة بمساحة السطح المشتركة بين قطبي الخلية وغشائها، وللحصول على 300 ملي أمبير باستخدام خلايا وقود عادية يلزم أن تكون تلك المساحة 60 سم$^2$، وهذا حيّز كبير جداً لا يمكن تأمينه في هاتف خلوي (انظر الشكلين 10 ـ 11 و10 ـ 12).

أحد سبل حل هذه المشكلة هو تنفيذ الخلية على شكل بنية

ثلاثية الأبعاد تحتوي على آلاف القنوات الميكرويّة التي تجعل مساحة التماس بين الغاز والمحفّز والقطبين عُظمى. في هذا التوجه نفسه، صنع فريق البحث طبقة سليكون نانوية المسامات تحتوي على ملايين المسامات التي يساوي قطر الواحد منها بضعة نانومترات. وتجعل هذه المسامات الصغيرة مساحة سطح الطبقة الفاعلة كبيرة، وهذا ما يزيد كفاءة المحفّز. في السنة القادمة، سوف تُستخدم نماذج أولية من خلايا الوقود تلك في الحواسيب المحمولة.




**الشكل 10 ـ 11: خلايا وقود صغيرة للهواتف الخلوية.**




**الشكل 10 ـ 12: خلية وقود ميكروية ذات مسامات صغيرة[28].**

تزن خلية وقود الميثانول المباشر تلك نحو 900 غ، ويمكنها تزويد نظام بالطاقة مدة خمس ساعات بعبوة ميثانول واحدة. أما كثافة قدرة هذه الخلية فتساوي 50 ملي واط/سم$^2$، وهي تتألف من كهروليت بوليمري يحيط به قطبان مع جُسيْمات محفّز. ويستخدم المهندسون تجمعات من أبواق الكربون النانوية الوحيدة الجدار، وهي نوع من أنابيب الكربون النانوية، لاجتذاب جُسيْمات المحفّز البلاتيني إليها والتصاقها بها. تتوزع جُسيْمات المحفّز البلاتيني على الأبواق النانوية على مسافات تساوي 2 نم، ويقال عنها إنها أصغر كثيراً من الممكن باستخدام هُباب الفحم المعروف. تساوي القدرة الوسطى التي تعطيها الخلية 14 واط (24 واط كحد أقصى) عند جهد يساوي 12 فولت وتركيز للوقود يساوي 10 في المئة من الميثانول.

أما النموذج الأولي لخلية توشيبا فيولِّد قدرة وسطى تساوي 12 واط، مع قيمة عظمى تساوي 20 واط. وهي تغذّي حاسوباً محمولاً مدة 5 ساعات تقريباً بعبوة واحدة سعتها 50 سم$^3$ من الميثانول.

يولِّد الميثانول الطاقة بأقصى مردود في خلية الوقود عندما يكون تركيزه في الماء مساوياً 3 ـ 6 في المئة. إلا أن محلول الميثانول المخفَّف يحتوي على طاقة قليلة، ولذا تكون ثمة حاجة إلى خزان وقود كبير لتوليد الكهرباء على نحو مديد. لقد حل المهندسون هذه المشكلة باستخدام الماء الذي يمثّل ناتجاً ثانوياً لعمل الخلية نفسها. فباستخدام أداة لتخفيف التركيز، يمكن خزن ميثانول عالي التركيز في خزان صغير، حجمه 35 × 65 × 33 مم$^3$، ووزنه 72 غرام، ويمثّل هذا الخزان عبوة سعتها 50 سم$^3$. ثمة أيضاً عبوات سعتها 100 سم$^3$ يقال إنها تغذّي حاسوب بالطاقة مدة 10 ساعات. ولا يزال المهندسون يعملون على تخفيض حجم خلية الوقود وعبوتها.

كان الغرض من خلايا وقود تبادل البروتونات، التي نوقشت سابقاً، استخدامها في تزويد الأجهزة الراديوية المزدوجة الاتجاه والهواتف الخلوية بالطاقة، وتوفير خلايا وقود لوحدات الطاقة المنزلية الثابتة. يمكن لخلايا وقود تبادل البروتونات أن تحل محل البطاريات التي تُصنع في الخارج للتطبيقات المحمولة، وأن تقلّص الاعتماد على المحطات الموزّعة لتوليد الطاقة من الوقود الإحفوري التي هي أقل كفاءة وأشدّ تلويثاً للبيئة. ويمكن استخدام التقانة الجديدة أيضاً في تطبيقات السيارات. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن استخدام هذه التقانة الجديدة في طيف واسع من التطبيقات في الإلكترونيات ولوحات الإظهار والاتصالات[29].

يتمثّل مصدر الطاقة المحمول، القابل للشحن، الذي يحتل موقع الصدارة اليوم، ببطارية شوارد الليثيوم التي تسيطر الشركات الآسيوية على سوقها. أما مصدر الطاقة البديل، الذي يمكن أن يوفّر كثافة طاقة أكبر، إضافة إلى «الشحن الآني» إذا أمكن تجاوز عقبات تقنية وأخرى تخص التكلفة، فهو خلية وقود الميثانول المباشر الذي يغذَّى سائلاً. يُحوِّل هذا النوع من خلايا الوقود الميثانول، وهو كحول بسيط، إلى كهرباء وماء بتفاعله مع أُكسجين الهواء. إن خلايا الوقود السائل ملائمة جداً للتجهيزات الإلكترونية الاستهلاكية المنخفضة القدرة. لذا يجري في مشروع مدته 3 سنوات تطوير خلايا عملية تستخدم الميثانول المباشر على شكل مجموعات من أغشية وأقطاب رخيصة التكلفة. تمثّل الأغشية والأقطاب مكوِّناً أساسياً لخلايا الوقود، وهي المسبِّب لـ 40 في المئة من تكلفة تصنيعها. أما المجموعات المقترحة فتستخدم مقادير صغيرة من المعادن النفيسة (كالبلاتين) محفّزاً. وسوف يجري توضيعها بكميات كبيرة في سيرورة طباعة بنفث الحبر بأشكال ثلاثية الأبعاد لتخفيض ضياع الوقود ومصادر تدنّي المردود الأخرى.

الابتكار الأساسي في هذه الخلايا هو تطويع الطباعة بنفث الحبر لاستخدامها في طباعة مواد فاعلة غير عضوية من قبيل المحفّزات الكهربائية، وتطوير التقنيات اللازمة لذلك. فقد استُخدمت سيرورة بخ لصنع مسحوق محفّز كهربائي يمكن توضيعه بالطباعة بنفث الحبر. سوف تكون لهذه المساحيق مساحة سطحية كبيرة، مقارنةً بالمحفّزات التي تُحضَّر بالطرائق الشائعة، وسوف تؤدّي تلك المساحة الكبيرة إلى زيادة النشاط التحفيزي (وإلى تقليص نسبة المعدن النفيس) بأكثر من مرتبة كِبَر. فإذا تم تطويرها بنجاح(29)، فإن هذه التقانة الجديدة سوف تحل محل بطاريات شوارد الليثيوم، أو تشاركها في السوق، معطيةً الولايات المتحدة حصة من سوق مصادر الطاقة المحمولة. ويمكنها أيضاً أن تقلّص الاعتماد على المصادر الخارجية في تأمين المعادن النفيسة، وأن توفّر بديلاً للبطاريات أفضل بيئياً (يمكن تدوير مواد خلايا وقود الميثانول المباشر). وسوف تكون أول سوق لها شواحن بطاريات الاتصالات الراديوية الثنائية الاتجاه والهواتف الخلوية. يُضاف إلى ذلك أن سيرورة الطباعة التي طُوِّرت في هذا المشروع يمكن أن تُستخدم لصنع منتجات أخرى كالبطاريات والمكثفات الفائقة والمُحِسَّات والإلكترونيات أيضاً.

كانت الهواتف الخلوية سابقاً مجرّد هواتف، أما الآن فهي مساعدات رقمية شخصية، ومتصفّحات إنترنت، وكاميرات، ومشغِّلات موسيقى أيضاً. ومع تكشُّف المشهد عن وظائف جديدة شرهة للطاقة، يُصبح تشغيل الهواتف بالبطاريات صعباً. لذا يأمل مصنِّعو الهواتف الخلوية بأن تكون خلايا الوقود الميكرويّة هي الحل، وهي نسخ صغيرة من التجهيزات المتوقعة كمصدر للطاقة النظيفة في السيارات.

إلا أن مشكلات الحجم والقدرة أبقت النماذج الأولى من خلايا

وقود الميثانول حبيسة مخابر الجامعات والصناعة. لذا استدارت الشركة Renew Power، المتفرّعة من جامعة إلّنوي، إلى حمض النمل، وهو مادة كيميائية تبخها النملة حين تعرُّضها إلى هجوم[30]. فقد بيَّن المهندسون في ربيع عام 2004 أنهم يستطيعون تغذّية هاتف خلوي بواسطة خلية وقود يتسع لها الهاتف الخلوي فعلاً.

وتأمل شركات استثمارات مالية عدة بتمويل شركات صناعية للبدء بالإنتاج الأولي لخلايا وقود للهواتف الخلوية بحلول بداية عام 2006. فمن بين جميع تطبيقات خلايا الوقود الميكرويّة المسوَّقة، تمثّل الهواتف الخلوية أكثر تطبيق رواجاً وربحاً، بسبب عائداتها الهائلة. فقد بيع نحو 500 مليون جهاز خلوي في عام 2003، والمتوقَّع أن ترتفع المبيعات في عام 2006 إلى 650 مليون جهاز. إلا أن الشركات التي تأمل بالاستيلاء على هذه السوق الواسعة تواجه مشكلات هائلة. فقبل ثلاث سنوات فقط، توقع مراقبو الصناعة أن تبيع شركات مثل سامسونغ هواتف خلوية مغذّاة بالميثانول بحلول عام 2003. إلا أن مشكلة تغيُّر الحاجة إلى الطاقة من لحظة إلى أخرى، ومشكلتَي الحجم ودرجة حرارة العمل، أحبطت تطويرها، ولم يقم أحد بإخراجها من المخبر إلى مخزن البيع.

يمكن لاستخدام حمض النمل وقوداً أن يحل جميع تلك المشاكل. بدايةً، صحيحٌ أن جُزَيء حمض النمل يُعطي كهرباء أقل من التي يعطيها جُزَيء الميثانول، إلا أنه يمكن أن يولّد طاقة على نحو أسرع مما تفعله خلايا وقود الميثانول ذات المواصفات نفسها، وهذا ما يحل مشكلة الحاجة المتغيّرة إلى الطاقة. وتعمل خلايا وقود حمض النمل جيداً أيضاً عند درجة حرارة الغرفة. أما خلايا الميثانول، فيجب أن تعمل عند درجات حرارة حارقة تساوي أو تزيد على 60 مْ لتعطي المستوى نفسه من الطاقة، وهذا غير عملي لجهاز يُستخدم بالقرب من الوجه. ويجب استخدام الميثانول بتركيز مخفَّف

في خلية الوقود، لذا فهو يحتاج إلى مضخّات ضئيلة وخراطيم لنقله تزيد من حجم الجهاز. وحمض النمل لا يواجه تلك المشكلة، ولذا لا تحتاج خلايا الوقود التي يُستخدم فيها إلى أجزاء متحركة، باستثناء عبوة قابلة للتبديل.

تغذّي عبوة حمض النمل الواحدة الهاتف الخلوي مدة تساوي ضعف المدة التي تغذّيه فيها بطارية شوارد الليثيوم المستخدمة اليوم، وفق رأي المختصين. إلا أن بعض الخبراء يشكّكون في أن حمض النمل سوف يهزم الميثانول في الإلكترونيات المحمولة. فثمة مشكلتان كبيرتان تواجهانه هما توافره وسُمِّيته. فالميثانول أكثر وفرة من حمض النمل، وأنت تستطيع شراءه من أقرب دكان إليك، وتستطيع غسل يديك به. لكنك لا تستطيع ذلك بحمض النمل لأنه يحرق الجلد.

تقول الشركة Renew Power إنها قد قطعت شوطاً كبيراً على طريق حل هذه المشكلات. صحيحٌ أن بطاريات شوارد الليثيوم الراسخة تمثّل منافساً حقيقياً قوياً، إلا أن ازدياد تعقيد الهواتف الخلوية، سوف يزيد الحاجة إلى مزيد من الطاقة في حيّز صغير، دافعاً في النهاية بالصناعة نحو خلايا الوقود.

ثمة نموذج أولي من حاسوب محمول طوَّرته كاسيو[31] عمل أكثر من 20 ساعة بتعبئة واحدة لوحدة تغذيته القائمة على خلايا الوقود.

### محرّكات التيار المستمر الدوارة

يعمل مصمِّمو ومصنِّعو خلايا الوقود باستمرار على تحسين مردود منتجاتهم. والتحدّي التصميمي الذي يواجههم يتعلق بتخفيض استهلاك الطاقة في كثير من المكوِّنات الكهربائية التي تسهم في تشغيل خلية الوقود.

تُعدُّ المراوح والضواغط والمضخّات ضرورية لعمل مضخّة الوقود، إلا أنها تُعتبر أحمالاً كهربائية طفيلية. فنظراً إلى أنها تتطلب طاقة من خلية الوقود نفسها، فإنها تؤثّر في مردود النظام بأسره. وبغية جعل المحرّكات التي تشغِّل مضخّات خلايا الوقود فاعلة حقاً، فإنها يجب أن تكون خفيفة الوزن ومتراصّة، وذات أعلى مردود ممكن كي توفّر طاقة أكبر للتطبيق المستخدمة فيه.

ثمة تقانة مسجلة اختراعاً تخص وشيعة سيارة تلغي نواة الحديد والملفات السلكية من المحرّكات المعهودة. والنتيجة هي محرّك جديد ذو مردود ممتاز لتحويل الطاقة، ونسبة قدرة إلى وزن أعلى، ووزن أخف. وهذه التقانة قابلة للتطبيق في محرّكات التيار المستمر ذات المَسافر والعديمة المَسافر.

تعطي العطالة الكبيرة المحرّك مقدرة على العمل ضمن مجال تغيّرات كبير، وهذا شيء مرغوب فيه دائماً في تطبيقات خلايا الوقود. والعطالة الكبيرة تمكِّن المحرّك من العمل على توليد الطاقة عند سرعات منخفضة. ويتصف هذا المحرّك أيضاً بالعمل الناعم والهادئ وبتوليد ضعيف للحرارة.

### المكاتب والمنازل والفنادق

سَجَّلت خلية وقود تجارية مركَّبة في مبنى مكاتب في اليابان رقماً قياسياً دولياً من حيث استمرارية استخدامها. فقد جرى تشغيلها مدة تساوي 9500 ساعة قبل إيقافها بغرض أعمال فحص مقررة. تُستخدم في الخلية سيرورة كهروكيميائية لتحويل الطاقة الكيميائية مباشرة إلى طاقة كهربائية وماء ساخن. وتأتي الطاقة الكيميائية عادةً من الهيدروجين الموجود في الغاز الطبيعي، ويمكن أن تأتي من البنزين العادي في تطبيقات السيارات. لا تحرق الخلية الغاز، لذا

فهي لا تلوث البيئة. وهذه الوحدة هي واحدة من أكثر من 100 خلية وقود من هذا النوع تعمل في أنحاء العالم.

وبيَّنت عملية محاكاة لانقطاع الكهرباء في مبنى برجي، كفاءة وحدة تغذية عديمة الانقطاع تغذّيها وحدات من خلايا الوقود. فقد قدَّمت الوحدة التي تبلغ قدرتها 3 كيلو فولت أمبير طاقة إلى مجموعة تجهيزات شبكة حاسوبية وشاشة بلازمية كبيرة، وشغَّل مولد محمول مكوّن من خلايا وقود برّاداً صغيراً إلى جانب الإضاءة وبعض الإلكترونيات الصغيرة الأخرى طوال مدة العرض التي دامت ساعة كاملة.

إن خلايا الوقود تعمل ما دام الوقود موجوداً. لذا فإن مدة العمل الاحتياطي تعتمد على عدد وأحجام خزّانات الوقود. تتراوح مدة العمل الاحتياطي عادة بين 4 و24 ساعة، وتُغذَّى خلايا الوقود بالهيدروجين عبر مجموعة مواءمة من أسطوانات غاز مضغوط. وتُنتج وحدات خلايا الوقود جهداً كهربائياً مستمراً يُطبّق على وحدة التغذّية العديمة الانقطاع.

تعطي كل وحدة خلايا وقود قدرتها 1 كيلو واط جهداً كهربائياً مستمراً يساوي 24 فولت مع تيار كبير جداً يساوي 40 أمبيراً. وتحتل وحدة التغذّية العديمة الانقطاع حيزاً من الحامل ارتفاعه 3.5 إنش، أما وزنها فيساوي نحو 36.5 كغ. وهي تتضمّن موصلات لاستقبال التيار المستمر من وحدات خلايا الوقود. أما البدء بإنتاجها فمقرر في عام 2005.

وأعلنت شركة ميتسوبيشي للصناعات الثقيلة (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)[32] خططاً للبدء بتقديم نظام توليد طاقة احتياطي تجاري يتكوَّن من وحدة خلايا وقود الأُكسيد الصلب قدرته تساوي

50 كيلو واط مع عنفة غاز بحلول عام 2006. لقد صُمِّم نظام التوليد الاحتياطي هذا، الذي يُتوقَّع تسعيره بنحو عدة مئات ملايين ين، للاستخدام في مبانٍ كبيرة من قبيل المكاتب والمشافي والفنادق.

وتبدو خلايا الوقود المنزلية أقرب كثيراً إلى الواقع. خذْ وقوداً هيدروكربونياً كالغاز الطبيعي، واستخدم محفِّزاً لاستخلاص الهيدروجين منه، واتركه يتفاعل مع الهواء، فتحصل على محطة توليد كهرباء منزلية. وعند اتحاد الهيدروجين مع أُكسجين الهواء، يولّدان كهرباء، مع ناتجين ثانويين هما الماء والحرارة، حيث يمكن استخدام الحرارة لتدفئة المنزل مباشرة، أو لتسخين الماء والتدفئة بواسطته.

تولِّد نظم خلايا الوقود المنزلية قدرة تساوي نحو 5 كيلو واط، أو طاقة تساوي 120 كيلو واط/ ساعة في اليوم، وهذا مقدار أكثر من كافٍ لمنزل متوسط. إلا أن الافتقار إلى بيانات أداء خلايا الوقود في الظروف المختلفة يمثّل واحداً من عدة عوامل تبطِّئ من قبول السوق لهذه التقانة الجديدة.

لذا أطلق الباحثون لدى هيئة المقاييس والتقانة الوطنية الأميركية[33] برنامجاً لتوفير تلك المعلومات. فهم يدرسون الكيفية التي تؤثِّر بها الحاجة المتغيّرة إلى الكهرباء والتدفئة، ودرجات الحرارة الخارجية، والرطوبة ونظم الطاقة، في مردود خلايا الوقود المصنَّعة من قبل منتجين مختلفين.

وحين اكتمال تلك البيانات، سوف يتمكن المستهلكون من استخدامها لفهم تكاليف ومزايا خلايا الوقود المشغَّلة في ظروف مناخية وجغرافية معيّنة، في الأوقات المختلفة من السنة، ولأغراض مختلفة من قبيل التدفئة أو توليد الكهرباء.

لقد جرى تركيب نظامَي خلايا وقود قدرة كل منهما 200 كيلو

واط في فندق شيراتون في شمال نيوجرسي. في إطار برنامج نيوجرسي للطاقة النظيفة[34]، ركَّبت شركة (Merck and Company Inc.) خلية وقود من صنع شركة UTC في مرفق البحث لديها. وقد رُكِّبت الخلية لتشجيع استخدام تقانات الطاقة النظيفة والمتجدّدة بموجب مبادرة على نطاق الولاية، ولأن برنامج نيوجرسي للطاقة النظيفة يكافئ شركات الولاية التي تركِّب تجهيزات توليد طاقة جديدة باستخدام تقانات بديلة، ولأن الشركة تحصل على حسومات من الهيئات الاتحادية أو هيئات الولاية الأخرى مقابل استخدامها تقانات بديلة.

## تجهيزات الاتصالات

جرى تطوير خلايا وقود ميكرويّة لاستخدامها في أجهزة الاتصالات العسكرية المحمولة من قبل شركتي MTI Micro Fuel Cells Inc. وHarris Corp.[35]. وهذه النماذج الأولية من نظام خلايا وقود الميثانول المباشر مخصَّصة للاستخدام في أجهزة الراديو التعبوية المحمولة باليد.

## الرافعات الشوكية

تشاركت مجموعة من الشركات الأميركية والكندية[36] في تطوير وصنع رافعات شوكيّة تُغذَّى بخلايا الوقود، وتحضيرها للتسويق تجارياً. يتضمّن المشروع تزويد رافعتين شوكيّتين من الفئة الصغيرة بنظام دفع قائم على خلية وقود قدرتها 10 كيلو واط مع نظام خزن للهيدروجين من هيدريد المعدن، وتطوير وسائل تزويد النظام بالوقود، وجمع معلومات عن تسويقه، وعرض الرافعتين على المستخدمين الصناعيين النهائيين.

## محطة لتوليد الطاقة

ركَّبت جامعة يال[37] (Yale University) محطة توليد طاقة من خلايا وقود تؤمّن التدفئة والطاقة الكهربائية لمبنى علم البيئة فيها. وسوف تؤمّن المحطة نحو 25 في المئة من احتياجات المبنى من الكهرباء، مع استخدام الحرارة الناتجة لتحقيق ضبط مُحكَم لدرجتَي الحرارة والرطوبة في مرفق المستودعات حيث يُحتفظ بعظام وتحف نادرة.

## المزروعات الطبية

قد تمكِّن خلايا الوقود السائل الميكرويّة التي طوَّرها باحثون لدى جامعة براون[38] (Brown University) من ابتكار تجهيزات طبية مديدة العمر من قبيل المزروعات الطبية التي تراقب مستوى السكر في دم مرضى السكر. لا تحتاج هذه الخلايا إلى غشاء ناقل للشوارد أو إلى محفّزات انتقائية عند الأقطاب لإبقاء السوائل المحتوية على الوقود منفصلة. بدلاً من ذلك، تستغل الخلية حقيقة أن السوائل لا تمتزج في ظروف معيّنة. فقد استفاد أولئك الباحثون من كيفية انسياب السوائل في القنوات الصغيرة: إنها لا تمتزج، ولذا يمكن إبقاء سوائل الوقود منفصلة من دون غشاء.

توصل مجموعة من هذه الخلايا تسلسلياً لتوفير طاقة لنظام نبضي يحاكي تدفّق الدم في الجسم. لقد أخفق مصنِّعو خلايا الوقود سابقاً في صنع تجهيزة من دون غشاء لا يحصل فيها امتزاج السوائل بوجود التدفّق النبضي. لكن إحدى الخلايا السوائلية الميكرويّة التي طوّرتها جامعة براون تحتوي على قناة متفرعة تحتضن ستة أقطاب. إن هذه الخلية ملائمة لتوليد الطاقة الكهربائية ضمن ظروف التدفّق النبضي، حيث يمكِّن تصميم التجهيزة من تزويد رقاقة إلكترونية بالكهرباء التي تتوَّلد نتيجة تغيّرات تركيز وقود من قبيل سكر الدم.

تمثّل هذه التغذّية الراجعة للطاقة مكوّناً ضرورياً لمُحِسٍّ مزروع في جسم مريض السكر(*).

### وحدات التغذّية الكهربائية

وُضعت خلية وقود من صنع شركة (Smart Fuel Cell) (SFC)[39] في وحدة تغذّية نقالة تغذّيها بالوقود عبوة ميثانول قابلة للتبديل. وهذه الوحدة موجودة في الاستخدام الفعلي في قطاعات كثيرة متنوعة، ومنها نظم حركة المرور والمُحِسَّات البيئية وتجهيزات المخيمات والتجهيزات التي تعمل في العراء، وهي متوافرة الآن تجارياً للزبائن الصناعيين الآخرين.

هذه الخلية مزوَّدة بعبوة ميثانول قابلة للتبديل سعتها 2.5 ليتر وتُعطي طاقة كهربائية تقدَّر بنحو 2500 واط ساعة. أما قدرة الخرج المستمرة فتساوي 25 واط، مع قدرة أعظمية تصل حتى 80 واط. وتعمل الوحدة ضمن مجال واسع من درجات الحرارة، ولذا فهي ملائمة لطيْف واسع من التطبيقات، ومنها حالات العمل في العراء وفي ظروف الطقس القاسية. وقد استخدمها مخيِّمون وسَعِدوا بتحررهم من شبكة الطاقة الكهربائية. وزُوِّدت قوارب بحرية بها واستطاعت تأمين كامل احتياجاتها من الكهرباء مدة أربعة أيام باستخدام عبوة وقود واحدة. إن الخلية المستخدمة في هذه الوحدات أخفّ كثيراً وأشد تراصاً من بطاريات الرصاص الحمضية، وأكثر وثوقية من نظم الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، وهي صامتة وعديمة التلويث مقارنةً بمولدات الديزل.

---

(*) عندما يرتفع مستوى السكر، تتغذّى الخلية به، فتولد كهرباء وتضخ الإنسولين في الدم. وحين انخفاض مستوى السكر، تتوقف التغذية بالوقود، فيتوقف ضخ الإنسولين.

### تخفيض التكاليف

في التطبيقات الثابتة التي هي من قبيل المُحِسَّات التي تعمل من بُعد ونظم الأمن، يعطي استخدام خلية وقود شركة SFC مزايا مهمة من حيث تكاليف دورة الحياة. فتكاليف التشغيل والصيانة المقترنة غالباً باستخدام البطاريات يمكن أن تُخفَّض. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن ضم خلية الوقود هذه إلى نظم موجودة كالبطاريات والخلايا الشمسية، لأن الضم الذكي لتقانات عدة معاً غالباً ما يؤدّي إلى منتجات ممتازة.

### فرقة موسيقية

عزفت مجموعة من الطلاب في جزيرة رود (Rhode Island) مقطوعات موسيقية بالاعتماد على كهرباء مولدة بخلايا وقود غشاء تبادل البروتونات[40]. فقد غذَّوا بها جميع آلاتهم الموسيقية الكهربائية، الغيتارات ومضخّمات الصوت وغيرها، مستخدمين الهيدروجين وقوداً.

### قوارب

زُوِّد قارب شراعي طراز X/V-1 بنظام توليد طاقة كهربائية من الهيدروجين قائم بذاته يمكن أن يستخدم ماءً نقياً أو مالحاً إضافةً إلى تقانة طاقة متجدّدة (طاقة رياح أو طاقة شمسية) لتوليد وخزن واستهلاك وقود الهيدروجين[19].

---

## مستقبل خلايا الوقود

في وقت ما من السنة القادمة قد تستطيع شراء حاسوب محمول مزوَّد بعبوة ميثانول توفّر طاقة مديدة تفوق تلك التي توفّرها البطاريات

المعهودة. لذا كنْ حذرا في المستقبل من اصطحاب حاسوبك إلى الطائرة.

عرض العملاقان اليابانيان توشيبا وNEC مؤخراً نماذج أولية عاملة من تجهيزات محمولة تستخدم خلايا وقود قائمة على الميثانول لتوليد الكهرباء. وتبذل شركات موتورولا وسامسونغ وسوني وهيتاشي وكاسيو وشركة الاتصالات اليابانية جهوداً مشابهة، ويخطط عدد منها لتسويق هذه التقانة تجارياً في عام 2006. ووفقاً لتقارير شركة استطلاع السوق ABI Research المتمركزة في نيويورك، يمكن لإنتاج بطاريات خلايا الوقود الميكرويّة أن يصل إلى 3 ملايين وحدة بحلول عام 2008، وأن تصل قيمة مبيعاتها إلى 500 مليون دولار.

يمكن للنماذج السابقة من خلايا الوقود أن تشغِّل حاسوباً محمولاً مدة خمس ساعات، أي المدة نفسها التي تشغِّله بها بطاريات شوارد الليثيوم الحالية، إلا أن شركة NEC تدّعي أنها طوَّرت خلية تمد الحاسوب المحمول بالطاقة مدة 40 ساعة، وأن الخلية سوف تكون جاهزة لدخول السوق في عام 2006.

ثمة عيب في خلية الوقود هو أنه على المستخدمين تبديل عبوات الميثانول (أو سكب الميثانول مباشرة في الخلايا) كل مرة ينفد فيها غاز الحاسوب. أما العقبة الكبرى في وجه اعتماد هذه الخلايا فيمكن أن تأتي من المشرِّعين. فالميثانول المتطاير، يحتاج في تفاعله إلى أن يكون ذا تركيز عالٍ، وهذا ما يقلق إدارة الطيران الاتحادية. لم تُعطِ تلك الإدارة رخصة لاستخدام خلايا الوقود الميكرويّة في الطائرات، وقد يستغرق إصدار الموافقة سنوات عدة[41].

وطيَّرت شركة[42] Aero Vironment دمية طائرة صغيرة تُغذِّيها خلية وقود بطاقة الدفع وذلك لبيان إمكان التحليق الكهربائي مُدداً طويلة. ويعتقد المسؤولون في الشركة أن هذه هي المرة الأولى التي تُستخدم فيها خلية وقود الهيدروجين وحدها لدفع طائرة.

تستطيع تلك الطائرة الصغيرة، التي تزن 6 أونصات ويبلغ طولها 15 إنشاً، والمسمّاة بالدبور، التحليق عدة ساعات، أي مثلي ما تستطيعه طائرة مشابهة لها تغذِّيها بطاريات بوليمر شوارد الليثيوم العالية الجودة التي طيَّرتها الشركة سابقاً مدة 107 دقيقة.

لكن اختبارات خلية الوقود بيَّنت أن ثمة تطويرات لابد من القيام بها. فالطائرة الدبور لم تستطع الطيران أكثر من خمس دقائق كل مرة، لأن خلايا الوقود جفّت إلى حد لم تستطع العمل عنده في مناخ كاليفورنيا الجاف.

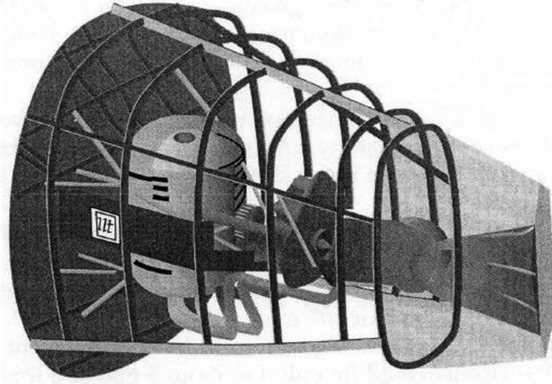
ثمة 18 خلية وقود على طول السطح العلوي لجناح الطائرة الدبور موصولة تسلسلياً، كل منها يولِّد 0.5 ـ 0.6 فولت. أما السطح السفلي للجناح فهو بنية عادية. وخلية الوقود هي جزء رقيق من السطح العلوي، وهي تتألف من خزان هيدروجين منخفض الضغط داخل الجناح، ويأتي الأُكسجين من الهواء في الخارج لتوليد الكهرباء والماء. أما الطبقة الخارجية فهي المهبط الذي يُنتِج الماء.

ويأتي الهيدروجين من هيدريد كيميائي ممزوج بالماء. والمولّد مخفي تحت سطح الجناح. وكانت القدرة الوسطى التي ولَّدها أكثر من 10 واط، وقد غُذِّي بها محرّك المروحة مباشرة من دون وساطة أي بطارية أو مكثفة أو أي وسيلة خزن أخرى. وغُذِّي بها أيضاً جهاز التحكّم الراديوي ونظم المتن الأخرى.

ضمن الظروف المخبرية، يمكن لخلية وقود الطائرة الدبور أن تُولِّد كثافة طاقة تساوي 400 واط ساعة/ كيلو غرام، وقد احتُسب وزن خلية الوقود والنظم الأخرى ضمن الوزن الكلي. بالمقارنة، تُعطي بطارية بوليمر شوارد الليثيوم القابلة للشحن في الطائرة الأخرى 143 واط ساعة/ كيلو غرام. إلا أن بطارية شوارد الليثيوم تعطي تلك

الطاقة فعلياً في عالم الواقع، في حين أنه ما زال ثمة الكثير مما يجب فعله لخلية الوقود للوصول إلى ذلك. يُشار إلى أن مخبر البحوث البحرية مهتم كثيراً بالطائرات المسيّرة الصغيرة التي تغذّيها خلايا الوقود وسوف يسعى إلى تطوير هذه التقانة.

تُصدر طائرات الركاب النفاثة على أرض المطار ضجيجاً وروائح كريهة، وهي تولّد 20 في المئة من إجمالي الانبعاثات في المطار. وذلك لأنها تحرق وقوداً في وحدة الطاقة الاحتياطية لتولّد الكهرباء اللازمة لتشغيل مكيّفات الهواء والتجهيزات الأخرى التي على متنها. على سبيل المثال، تُصدر وحدة الطاقة الاحتياطية في الطائرة بوينغ 777 من دخان أُكسيد الآزوت ما يعادل ما تُطلقه 155 سيارة طراز شيفروليه إمبالا.



**الشكل 10 ـ 13: صورة تخيلية لمولد خلايا وقود مبين هنا ضمن علبة زرقاء. يمكن لهذا المولد أن يحل محل وحدة التوليد الغازية الاحتياطية الموجودة في ذيل طائرة ركاب نفاثة[43].**

إلا أن نوعاً جديداً من خلايا الوقود تُستخدم فيه تقانة الأُكسيد الصلب، بدلاً من تقانة غشاء تبادل البروتونات المفضلة في السيارات والإلكترونيات الصغيرة، يمكن في النهاية أن يؤدّي المهمة نفسها

على نحو أنظف كثيراً، إضافة إلى تحقيق مردود أكبر في أثناء الطيران. يمكن لخلايا وقود الأُكسيد الصلب أن تستخدم وقود الطائرة منبعاً للطاقة. ومع أن هذه الخلايا ما زالت في مرحلة النموذج الأولي في المخبر، فإن التحسينات الأخيرة التي أُدخلت فيها جعلت شركة بوينغ ووكالة الفضاء الأميركية تنظران جديّاً في استخدامها في الطائرات. وإذا سارت الأمور على ما يرام، فإن بوينغ سوف تبدأ بتطوير نموذج خلية وقود يُركَّب في الذيل في عام 2005 يمكن تسويقه تجارياً في غضون 10 سنوات. ويمكن لهذه الخلية أن تُحسِّن المردود بمقدار الضعف وأن تُلغي كلياً الانبعاثات على الأرض الخارجة من وحدة الطاقة الاحتياطية (انظر الشكل 10 ـ 13).

إن استخدام خلايا وقود الأُكسيد الصلب مهم جداً في الطائرات، خصوصاً لأن إنقاص كمية الوقود تجعل الطائرة أخف، وهذا يعني الحاجة إلى وقود أقل للإقلاع والتحليق. ويمكن للخلايا في النهاية أن تولِّد الكهرباء في أثناء الطيران أيضاً بدلاً من نظم الهواء المضغوط التي تمتص الطاقة من محرّك الطائرة لتأمين الضغط الداخلي فيها أو لتشغيل نظام منع التجمد. أكثر من هذا، يمكن للطائرة أن تستفيد من ناتجَيْ خلية الوقود الثانويين، أي الماء والحرارة. لكن وبرغم التطوّرات الأخيرة، فإن استخدام مولّدات خلايا الوقود في الطائرات يقتضي جعلها أخفّ وأقل تكلفة وأعلى قدرة. أي يجب أن تُعطي قدرة تساوي 450 كيلو واط، أي ما يكفي لتغذّية 20 منزلاً. في ضوء الأبحاث التي تُجريها وكالة الفضاء الأميركية مع شركائها، يُتوقَّع تحقيق التحسينات المطلوبة في غضون بضع سنوات. وسوف يجعل تصميم الخلايا تصميماً نسائقياً، بغرض إنتاجها كميّاً، تكلفتها مقبولة. وعلى المدى البعيد، يمكن لخلايا الوقود أن تُشغِّل محرّكات الطائرة، إلا أنه من الكافي الآن أن تجعل المطارات أنظف وأهدأ.

يقول الباحثون لدى مخبر لورانس ليفرمور الوطني (Lawrence Livermore National Laboratory) في كاليفورنيا أن خلايا الوقود الميكرويّة يمكن يوماً ما أن تحل محل بطاريات شوارد الليثيوم في الإلكترونيات الاستهلاكية.

تضم طريقة صنع هذه الخلايا ذات الغشاء الرقيق سيرورات الدارات الإلكترونية الميكرويّة، ومكوّنات السوائليات الميكرويّة، وتقانة النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة. يوضع بين القطبين طبقات رقيقة من الكهروليت يفصل بينها مقدار مناسب من محفّز كيميائي. وتوزِّع عناصر التحكّم السوائلية الميكرويّة مزائج كحول الميثيل عبر رقاقة سليكونية على سطح أحد القطبين، ويمر الهواء فوق القطب الآخر. وتسخِّن سخَّانات كهربائية متكاملة مع الخلية طبقات القطبين والكهروليت، وهذا يزيد من المقدرة على نقل البروتونات المتولِّدة بالتحفيز، من وحدة الوقود عبر الكهروليت إلى قطب يتنفس الهواء، حيث تتحد مع الأُكسجين لتوليد تيار كهربائي.

ويتوقع أولئك الباحثون أن مصادر الطاقة التي تستخدم خلايا الوقود القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة سوف تحل محل البطاريات القابلة للشحن، ومنها بطاريات شوارد الليثيوم أو بوليمر شوارد الليثيوم، وذلك في الإلكترونيات الاستهلاكية التي تتضمّن الهواتف الخلوية، والحواسيب المحمولة باليد والمحمولة العادية. ويقولون أن تكلفة هذه الخلايا تساوي نصف تكلفة البطاريات القابلة للشحن الحالية، وأنها أخفّ منها وزناً وأصغر حجماً بنحو 30 في المئة.

أما مصمِّمو ومهندسو السيارات، فعليهم أن يبدؤوا من الصفر في تطوير مجموعات هجينة لتوليد ونقل الحركة، تستخدم الكهرباء وخلايا الوقود. صحيحٌ أنه يمكن تكييف هيكل سيارة لاستخدامه في سيارات ذات طراز مشابه وصنعه ضمن خط قائم لإنتاج السيارات،

إلا أن مجموعة توليد ونقل الحركة في عربات خلايا الوقود الهجينة مختلفة كلياً عن تلك الخاصة بمحرّكات البنزين، وتحتاج إلى توفّر خبرة كبيرة عند المهندسين.

يجب أن يبدأ المصمّمون بفكرة أن ثمة آلات كهربائية في مجموعة توليد ونقل الحركة، وأن عليهم أن يكونوا قادرين على التعامل مع الطاقة الكهربائية، إضافة إلى تحقيق متطلبات تخص أنواع المحرّكات الكهربائية المختلفة. إن صنع عربات كهربائية مكلف حالياً، مع أن مصنِّعي السيارات قد قاموا خلال العقد الماضي بتقليص أوزان وحجوم إلكترونيات القدرة على نحو ملحوظ بعد أن كانت بحجم البراد. ومن حسن الطالع أن ثمة وفرة من المحاكيات المتاحة للمصمّمين لمساعدتهم على تصميم نظم داخلية جديدة للسيارات الكهربائية والهجينة.

إن عربات خلايا الوقود هي سيارات المستقبل، لكن متى سوف يأتي ذلك المستقبل؟ لقد صنعت دايملر كرايسلر ست سيارات اختبارية مزوَّدة بنظام خلايا الوقود منذ عام 1994، وهي تخطّط لتسويق سيارات خلايا وقود في عام 2005 مصنوعة على خط إنتاج. والسيارة نيكار 5 (NECAR 5) التي صنعتها الشركة في عام 2000 هي عربة عديمة الانبعاثات، وتستطيع السير مسافة تساوي نحو 450 كم بتعبئة وقود واحدة.

وأخرجت شركة جنرال موتورز أول سيارة خلايا وقود استعراضية في عام 2003. ولدى الشركة برنامج تعاون مدته خمس سنوات مع شركة تويوتا لتسريع تطوير عربات التقانات المتقدمة. وتعمل الشركتان في مشاريع عربات ونظم من قبيل المجموعة المشتركة لمكوّنات التحريك والتحكّم الكهربائية لاستخدامها في

سيارات المستقبل الكهربائية التي تعمل بالبطاريات أو بخلايا الوقود أو بكلتيهما[44].

تقل تكلفة خلايا الوقود التي صنعتها جنرال موتورز عن 500 دولار للكيلو واط، وهذه التكلفة متجهة نحو الـ 50 دولاراً التي يُسعى إليها في الإنتاج الكمي. على الشركة جنرال موتورز أن تصل إلى ذلك الهدف في عام 2006 تقريباً كي تبتدئ برنامجاً مدته أربع سنوات لإقامة المصانع، تمهيداً للبدء بإخراج السيارات من خط التجميع بحلول نهاية هذا العقد[45].

وفي السنوات القادمة، سوف يسابق الكهروكيميائيون والمهندسون لدى الشركة جنرال موتورز الزمن لاستمثال خلايا الوقود. فهم سوف يُمضون ساعات طويلة وهم يحدقون عبر مجهر، ثمنه 250 ألف دولار، في الذرّات الراقصة على أسطح أغشية خلايا الوقود. تتفاعل الأغشية المطلية بالبلاتين مع الهيدروجين لتوليد الكهرباء. وأحد الأهداف هو اعتصارها لاستخراج أكبر مقدار من التيار الكهربائي منها باستخدام أصغر مقدار من البلاتين الذي يساوي سعر الأونصة منه 629 دولار. إنهم يعتقدون أنهم ما زالوا لا يستغلّون كل ذرّة منه استغلالاً تاماً. فالسباق نحو سيارات خلايا الوقود وإنتاجها وقبولها في أنحاء العالم على أشده[45] (انظر الشكل 10 ـ 14).

أما خلايا الوقود الأنبوبية الميكرويّة، التي يُقال أنها تعمل بمستويات قدرة تساوي 10 أضعاف تلك التي تعمل عندها خلايا وقود الصفيحة والإطار المعهودة، فهي في قيد التطوير لدى الشركة Physical Sciences Inc. في ماسَّاشوستس، لمصلحة مركز جونسون الفضائي في هيوستون التابع لوكالة الفضاء الأميركية[46]. إن المزية الرئيسة للبنية الأنبوبية الميكرويّة هي كثافة القدرة التي تساوي 1 واط/غرام، مقارنةً بـ 0.1 واط/غرام في خلايا الوقود العادية.

**سيارات خلايا الوقود التي احتلت مركز الصدارة في سباق تسويق سيارة الهدروجين**

سيارة جنرال موتورز طراز Hy-wire

**جعلت السيارة Hy-wire الشركة جنرال موتورز أقوى منافس. وفي ضوء التقدم الذي حققته الشركة بدون جلبة في صنع خلايا الوقود، فإن سيارتها الرياضية القادمة سوف تكون أبعد مدى وأكبر سرعة وأفضل تداولا وأرخص صنعا.**

سيارة تويوتا طراز FCHV

جعل الإنفاق الكبير على البحث طوال ما يزيد على العقد الشركة تويوتا أقوى منافس لجنرال موتورز. فلديها فعلا ثماني سيارات تعمل بخلايا الوقود ذات هياكل رياضية. وكشفت تويوتا أيضا عن سيارة العرض الرياضية التالية برغم أنها ما زالت غير جاهزة للاستعمال.

سيارات فورد/دياملر كرايسلر
فورد: Focus FCV
دايملر: F-Cell, Citaro bus

تمتلك الشركتان فورد ودايملر سوية 36% من Ballard، وهي شركة صناعة خلايا وقود رائدة. وقد نشرت دايملر حقليا كثيرا من نماذج سيارات خلايا الوقود، وسوف تستمر فورد باختبار 15 سيارة خلال السنة القادمة. إلا أن مساعي الشركتين تأثرتا بمشاكل Ballard، وبمشاكلهما أيضا.

سيارة نيسان طراز Xterra

تعاونت الشركة نيسان بخصوص تقانة خلايا الوقود مع الشركتين Ballard و United Technologies، وهي تطور الآن محركات مع الشركة رينو التي تمتلك 44% من أسهم الشركة.

سيارة هوندا FCX

تختبر بلدية مدينة لوس أنجلس ثلاث سيارات FCX مزودة بخلايا وقود Ballmard. وهذه السيارات، القائمة على الطراز سيفيك، تستخدم هيكلا عاديا وتقانات هوندا الموجودة.

**الشكل 10 ـ 14 : سيارات خلايا الوقود** [45]

تحتوي خلية الوقود هذه على عدة مجموعات من الأقطاب والأغشية الأنبوبية التي تعمل ضمن تدفّق متقاطع من الأُكسجين والهيدروجين. وتتألف كل مجموعة من تلك المجموعات من غشاء تبادل بروتونات أنبوبي، ومصعد على السطح الداخلي للغشاء، ومهبط على السطح الخارجي. أما أبعادها، التي يُسعى إليها، فتساوي 600 ميكرون لقطر الغشاء الداخلي، و50 ميكرون لسماكة الغشاء، و23 ميكرون لسماكة المصعد.

وإحدى نهايتي المجموعة مغلقة، والنهاية الأخرى مفتوحة ومتصلة بمجمِّع التيار. وموزِّع الهيدروجين ومجمعات التيار الكهربائي المسطّحة فيها تحتاج إلى حيّز أصغر كثيراً مما تحتاج إليه الصفائح الثنائية القطبية المستخدمة في خلايا الوقود المذكورة سابقاً ذات الصفيحة والإطار.

ويمكن للمحفّز Ni-Sn أن يحل محل البلاتين في سيرورة منخفضة درجة الحرارة لاستخراج وقود الهيدروجين من النباتات. وفقاً لقول مهندسين من جامعة ويسكونسن ـ ماديسون[47]، يوفّر المحفّز الجديد، مع ابتكار آخر يُنقِّي الهيدروجين لاستخدامه في خلايا الوقود، طريقة جديدة لتحقيق الانتقال من الوقود الإحفوري إلى نوع جديد من الطاقة المتجدّدة قائم على الهيدروجين. إن البلاتين محفّز فاعل جداً، لكنه غال جداً، إضافة إلى أنه يمثّل مشكلة في توليد الطاقة الواسع النطاق لأنه مستخدم أيضاً في مواد مصعد خلية الوقود ومهبطها.

يُستخدم في هذه السيرورة الوحيدة الخطوة الضغط والحرارة مع المحفّز لتحويل هيدروكربونات من قبيل الغلوكوز إلى هيدروجين. تتكوّن نواتج التحويل من 50 في المئة من الهيدروجين، و50 في المئة من ثاني أُكسيد الكربون والألكانات الغازية. أما الجُزَيئات التي هي أكثر نقاوة، ومن أمثلتها غليكول الإيثيلين والميثانول، فتتحوّل

كلياً إلى هيدروجين وثاني أُكسيد الكربون. ونظراً إلى أن النباتات التي تُزرع لاستخراج الوقود منها تمتص غاز ثاني أُكسيد الكربون الناجم عن التحويل، تُعدُّ هذه السيرورة محايدة من حيث مفعول الاحتباس الحراري. تحصل هذه السيرورة في الطَور السائل عند درجة حرارة تساوي 227 مْ من دون تبخير الماء وإبعاده. وهذا يمثّل حفظاً كبيراً للطاقة مقارنةً بطرائق إنتاج الإيثانول أو توليد الهيدروجين التحويلي القائم على الوقود الإحفوري التي تبخّر الماء في الجو. ويحاول الباحثون إيجاد طريقة مركَّبة يفكِّك فيها المحفّز Ni-Sn الهيدروكربونات المعالَجة بالأُكسجين لإنتاج هيدروجين نظيف نسبياً. ثم يُمرَّر الهيدروجين إلى مرحلة ثانية من محفّز شديد الإزاحة (Ultrashift Catalyst) لمزيد من التنقية والتخلّص من أول أُكسيد الكربون.

وثمة مفهوم تصميمي جديد لخلايا وقود الميثانول المباشر يمكِّن من بناء كدسة خلايا وقود يمكن لوزنها أن يساوي ثلث وزن كدسة خلايا الوقود ذات الصفائح الثنائية القطبية المعهودة التي تعطي القدرة نفسها. ويمكن صنع المكوّنات الإنشائية الحاملة للخلايا والكُدُس الجديدة من اللّدائن الرخيصة نسبياً. ومقارنةً بكُدُس خلايا الوقود ذات الصفائح الثنائية القطبية المعهودة، يمكن تجميع وتفكيك وتشخيص أعطال الكدس الجديدة بسهولة كبيرة. ويُتوقَّع أن تدفع هذه التحسينات بكُدُس خلايا الميثانول المباشر لتصبح أقرب إلى التسويق التجاري.

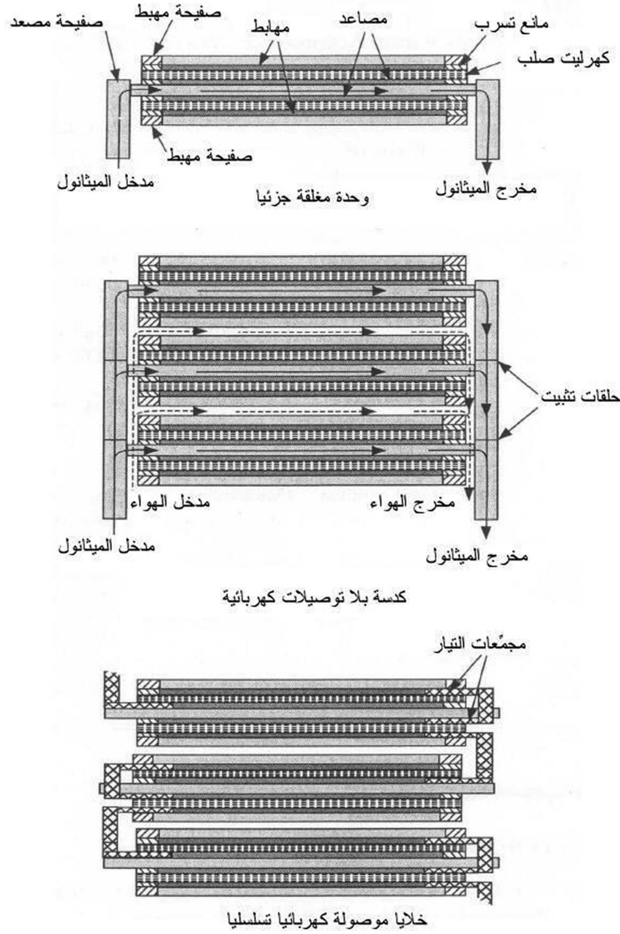
في كُدُس خلايا الوقود العادية ذات الصفائح الثنائية القطبية، تنتشر بين الخلايا صفائح مزدوجة القطبية، وهي مكوّنات إنشائية تصل بين الخلايا وتوزّع المادتين المتفاعلتين (الميثانول والهواء). وتتوضّع الخلايا والصفائح الثنائية القطبية بين صفائح معدنية طرفية. وتُرصّ كدسة الخلايا تحت الضغط عادةً معاً بقضبان رابطة تُمسك

بالصفائح الطرفية. توفّر تشكيلة الصفائح المزدوجة القطبية مزية المقاومة الداخلية الكهربائية الصغيرة جداً، إلا أنه عندما تكون قدرة الكدسة بضعة واطات فقط، لا تكون ثمة حاجة ماسة للمقاومة الداخلية الصغيرة التي تجعل تبديد الطاقة الداخلي منخفضاً.

نحو 80 في المئة من كتلة كدسة خلايا الوقود ذات الصفائح المزدوجة القطبية تأتي من تلك الصفائح، والصفائح الطرفية، وقضبان الربط. وتُصنع الصفائح المزدوجة القطبية عادةً من مواد مركّبة غرافيتية، ويجب أن تُقَوْلب أو تُشغَّل لتزويدها بقنوات لتدفّق الوقود بتكلفة تمثّل جزءاً رئيساً من تكلفة الكدسة الكلية. وفي حالة حدوث عطل في إحدى الخلايا، من الضروري تفكيك الكدسة بأسرها بغية تشخيص العطل. لذا فإن المطلوب هو تصميم يُقلِّص كتلة الكدسة، ولا يتطلب ضغطاً شديداً لضمان منع التسرّب، وسهولة تشخيص الأعطال، ويقلِّص تكلفة التصنيع.

إن التصميم الجديد يحقّق هذه المتطلبات، وهو ملائم على وجه الخصوص للتطبيقات التي تساوي فيها القدرة المطلوبة 20 واط. يلغي هذا التصميم الصفائح المزدوجة القطبية والطرفية وقضبان الربط. أما لَبِنة البناء الأساسية للكدسة، فهي وحدة كتيمة تحتوي على صفيحة مصعد، وصفيحتي مهبط، وخليتين متجاورتين (انظر الشكل 10 ـ 15). وتُصنع الحوامل الإنشائية ومكوّنات قناة تدفّق الوقود في الخلية من لدائن رخيصة. وتُجمَّع الوحدات وتُختبر كل واحدة على حدة، ثم تُجمَّع الوحدات في كدسة. تُجمع الوحدات بواسطة موانع تسرّب ضاغطة تشابه موانع التسرّب السَّحّابة في أكياس البلاستيك التي تُستخدم عادة لخزن الأطعمة. وتتضمّن صفائح المهبط والمصعد مجمِّعات التيار التي توصل نهاياتها الداخلية مع الأقطاب، وتُستخدم نهاياتها الخارجية لتكوين توصيلات الوحدات التسلسلية أو

التفرّعية. ونظراً إلى أنه ليس ثمة حاجة لقمط الكدسة أو ضمها معاً بواسطة الضغط، يمكن تفكيكها بسهولة لاستبدال وحدة كتيمة معطلة[48].




**الشكل 10 ـ 15: وحدات مغلقة جزئياً موصولة بحلقات تثبيت، ومجمعات تياراتها موصولة معا لتكوين كدسة خلايا وقود. تحتوي كل وحدة ةمغلقة على زوج من خلايا الوقود الموصولة معا بالتماس المباشر[48].**

أخيراً، إذا كانت محرّكات البنزين والمازوت هي مصادر طاقة السيارات المتاحة اليوم، فإن خلايا الوقود، وفقاً لما يقال، هي مصادر طاقة المستقبل بسبب كونها ودودة للبيئة. ونظراً إلى أن الهيدروجين يُعتبر على نطاق واسع وقود السيارات على المدى البعيد، فإن ثمة حاجة إلى عدد من المحفّزات الكيميائية التجارية الجديدة لتوليد الهيدروجين وتنقيته. وثمة حاجة إليها أيضاً ضمن خلية الوقود نفسها لتحفيز التفاعل بين الهيدروجين والأُكسجين الذي يمثّل أساس توليد الطاقة في خلايا الوقود. ويُعتقد أن ثمة فرصاً جيدة للمحفّزات المصنوعة من الذهب في هذا المجال (انظر الجدول 10 ـ 3).

**الجدول 10 ـ 3**: المجالات المحتملة لاستخدام المحفّزات الذهبية النانوية الجُسيْمات في نظم السيارات

| مصدر طاقة السيارة | التطبيق المحتمل للمحفّز القائم على الذهب | التفاعل | الخصائص الرئيسة للمحفّز الذهبي النانوي الجُسيْمات | العقبات التقنية المتبقّية |
|---|---|---|---|---|
| خلية الوقود | نظم معالجة الوقود لإنتاج هيدروجين نظيف | تفاعل إزاحة غاز الماء لإنتاج الهيدروجين. | فعالية عالية عند درجة حرارة منخفضة . | ديمومة غير واضحة. |
| | | أكسدة انتقائية لأول أُكسيد الكربون لتنظيف الهيدروجين . | فعالية عالية عند درجة حرارة منخفضة . | ديمومة غير واضحة. |
| | | تفكيك الميثانول لإنتاج الهيدروجين . | فعالية عالية. | قليل من الدراسات المنشورة حتى الآن . |
| | محفّز ضمن خلية الوقود | إزالة أول أُكسيد الكربون بالأكسدة. | تحسين الناقلية الكهربائية. | قليل من الدراسات المنشورة حتى الآن. |
| محرّك مازوت | مكوّن لمحفّز ثلاثي المفعول للتحكّم بانبعاثات محرّكات المازوت | حرق الـ CO و الـ HC وإرجاع الـ Nox | فعالية منخفضة درجة الحرارة (وفعالية عالية لإرجاع الـ NOx). | الديمومة الحرارية وتسمم المحفّز بـ $SO_2$. |
| محرّك بنزين | محفّز خفيف لمحرّك البنزين | حرق الـ CO والـ HC | فعالية منخفضة درجة الحرارة. | الديمومة الحرارية وتسمم المحفّز بـ $SO_2$. |

# الهوامش


1. G. Valero, «Wanted for Fuel Cells: Highly Conductive Compounds,» *Modern Plastics* (Jan 2004), pp. 28-29.
2. B. Stone, «Alternative Energy,» *Newsweek* (17 Nov 2003), pp. E22-E26.
3. V.P. McConnell, «Composites and the Fuel Cell Revolution,» *Peinforced Plastic* (Jan 2002), pp. 38-44.
4. L. D. Burns, J. B. McCormick and C. E.Barroni, «Bird, Vehicle of Change, *Scientific American,» (Oct 2002), pp. 64-73.*
5. R. N. Katz, «Solid Oxide Fuel Cells,» *Ceram Industry* (Oct 1999), pp. 25-26.
6. Z. G.Yang, J. W. Stevenson and P. Singh, «Solid Oxide Fuel Cells,» *AM&P* (June 2003), pp. 34-37.
7. http://link.abpi.net/l.php?20030320A4, 3/23/03 (4p) and http://science. nasa.gov /headlines/y2003/18marfuelcell.htm?-list911586(6p); 7/7/03.
8. Small, Ultra Efficient Fuel Cell Systems, 8/8/03, 2p, http://jazz.nist.gov / atpcf / prjbrief.cfm ?ProjectNumber = 00-00-4739.
9. N. P. Bansal and J. C. Goldsby, «Formulations for Stronger Solid Oxide FuelCell Electrodes,» *NASA Tech Briefs* (Feb 2004), p. 43.
10. http://link.abpi.net/l.php?20031009A4; 10/9/03, 6p.
11. Johnson, J., Fuel Cell Catalysts Made of Enzymes Found in Nature, Iiis Innovation Ltd, *AM&P,* Jan 2004, p. 19.
12. S. Narayanan [et al.]. «Improved Polymer/ Solid-Electrolyte Membranes for Fuel Cells,» *NASA Tech Briefs* (Sept 2002), p. 52.
13. http://www.japantoday.com/e/?content = news&cat = 4&Id = 265139.
14. http://www. fuelcellpropulsion.org/army_loco_1aug2003.htm.
15. http://energyinfosource.com/ dg/ news.cfm?id = 20341.
16. *Composites Week* 5(16), April 21, 2003.
17. http://marad.dot.gov / nmrec/ energy%20&%20emissions/ images / Newsletter% 20 Fall 1. 202002. pdf

18. http://www.anavu.com/trucknews.html.
19. http://haveblue.com/news/currentpr/020703.htm.4/01/03, p. 2 of 8.
20. http://www.media.gm.com/news/ releases/ 030109 _mili.html.
21. «DaimlerChrysler Pushes Fuel-Cell Cars toward the Commercial Market- place *Scientific American* (Jan 2004), p. 63; www.sciam.com.
22. «Coalition of Industry Leaders Launches National Fuel Cell Bus Initiative,» *Composites Week*, 5 (46), 2 (2003).
23. http://www.utdcfuells.com/news/ archive/ 111402.shtml.
24. http://www.utcfuelcells.com/news/archive/111102.shtml.
25. http://www.ballard.com.
26. http://www.palcan.com/s /NewsReleases.asp ?ReportID = 44100.
27. http://biz.yahoo/com/prnews/02129/nyf025_1.html.
28. Mini Fuel Cells Slated to Power Cell Phones, *Machine Design,* Nov 6, 2003, pp. 43-45.
29. http://jazz.nist.gov/atpcf/prjbriefs/ prjbrief.cfm ?ProjectNumber = 00-00-4822; 8/8/03, 2p.
30. Jonietz, Ant Power Packs, Technol. Review, Sept 2004, p. 89.
31. http://science.nasa.gov/headlines/y2003/18 marfuelcell.htm ?-list911586; July 7, 2003, p. 1.
32. http://www.mhi.co.jp/power/e_power/techno/sofc/index.html. 08/02/04, p. 2 of 4.
33. J. Blair, «Rating the Performance of Residential Fuel Cells, «*NIST Tech Beat*, p. 1, 09/26/03; www.nist.gov.
34. http://www.utduelcells.com/news/archive/l03002.shtml.11/01/02. p. 2.
35. http://www.mechtech.com/newsandevents/article.cfm?A_ID = 14105, 11/01/03, p. 2.
36. http://www.hydrogenics.com/ir /NewsReleaseDetail-1.asp ?RELEASED = 120530, 11/01/03, p. 1.
37. http:// biz.yahoo.com/prnews/030403/nyth073_2.html.
38. Fuel Cells May Power Medical Implants, Machine Design, May 8, 2003, p. 30. 39. http://www.smartfuelcell.de/en/presse/c020911.html. 7/5/03, p. 2.
40. mailto:rkmccurdy@yahoo.com > rkmccurdy@yahoo.com;

41. J. Freund, «Fuel-Cell Supercharge!,» *Business 2.0* (Oct 2003), p. 36.
42. M. A.Dornheim, «Fuel Cells Debut,» *Av. Wk. Sp., Technol.* (2 June 2003), p. 52.
43. D. Talbot, «Flying the Efficient Skies,» *Technol. Review (*2003), p. 26,
44. «Automakers See Fuel Cells as the Next Best Power, *«NASA Tech Briefs (*July 2003), pp. 24-26.
45. R King, «Auto Fuel Cells,» *Business 2.0* (Oct 2003), pp. 96-98.
46. M. Kimble, «Microtubular Fuel Cells Have Ten Times the Power Density,» *AM&P* (2004), p. 35.
47. «Fuel Cells May Say Goodbye to Platinum Catalysts,» *Machine Design* (2004), p. 50.
48. S. Narayanan and T. Valdez, «Lightweight Stacks of Direct Methanol Fuel Cells,» *NASA Tech Briefs* (August 2004), pp. 38-39.

# المراجع

ASM International, Stuart Energy and Hamilton Sundstrand Complete Significant Milestone in Strategic Alliance - Unveil First Jointly Developed PEM-based $H_2$ Fueling Prototype, http:/ /www. asminternational.org/Content/ Navigation Menu/ News/ Headline News/. 12/11/02, 7 p.

Fuel Cells: Applications and Opportunities, http://www.escovale.-com/fc/ fc_management_report.htm, p. 1, 7/5/03.

Jennifer@fue1cells.org, and fue1cell@listbox.com, Jennifer Gangi, Fuel Cells 2000s Fuel Cell Technology Update - Oct 2003, p. 1.

# 11

# بوليمرات البلّورات السائلة/ شبكات متداخلة للبوليمرات/ سيراميكات الأطوار المتداخلة

## بوليمرات البلّورات السائلة

### تقديم

بوليمرات البلّورات السائلة (Liquid Crystal Polymers) هي فئة من البوليمرات الحرارية التلدُّن المتقدمة المتحدة، لا بالبنية الكيميائية، بل بنزوعها إلى تكوين بُنى منتظمة في كل من الحالتين الصلبة والمصهورة. إن البنية المنتظمة لهذه البولي إسترات التشاركية التامة العطرية السائلة البلّورات تتصف بخواص ميكانيكية وكيميائية وحرارية استثنائية جعلتها قطاعاً سريع النمو في مجال البوليمرات المتقدمة.

تتميز بوليمرات البلّورات السائلة من غيرها من اللّدائن ببنيتها الميكروويّة الشبيهة بالقضيب في الطَور المصهور. أما الراتنجات الأخرى فتتصف بجُزَيئات عشوائية الاتجاهات في الطَور المصهور. حينما تنصهر بوليمرات البلّورات السائلة، تستطيع جُزَيئاتها الطويلة الصلبة الاصطفاف في تشكيلة شديدة الانتظام تولِّد عدداً من السِمات

الفريدة، منها التبلور المنخفض الحرارة، والتدفّق الشديد، ومقاومة الصُهارة الجيدة. وتؤثِّر بنيتها الجُزَيئية تأثيراً قوياً في خواصها وخصائص معالجتها إلى حد أنه من الأفضل معاملتها بوصفها فئة بوليمرات منفصلة عن الراتنجات غير المتبلورة أو شبه المتبلورة. مع ذلك، وبرغم تفرُّدها بالخواص، فإنه يمكن معالجتها بكل تقنيات التشكيل اللّدائني الحراري المعروفة.

فهي تتصف، مثلاً، بالتدفّق السهل في قوالب الأجزاء الرقيقة جداً أو الشديدة التعقيد، وبمدة بقاء قصيرة في القالب، وبإعطائها قطعاً ذات إجهاد قولبة منخفض، وبعدم الحاجة إلى التشذيب وغيره من خطوات الإنهاء الأخرى، وبانخفاض معدّل انكسار القطع في أثناء التجميع. يمكن لهذه المزايا أن ترفع معدّل التجميع النهائي أو إنتاجية النظام بنحو 3 في المئة أو أكثر، وهذا أكثر من كافٍ للتعويض عن تكلفة الراتنج العالية[2].

## فئات بوليمرات البلّورات السائلة وخواصها

إن الشكل الفريد لبوليمرات البلّورات السائلة هو المسؤول عن معظم الخواص التي تميّزها من البوليمرات الأخرى. تُصوَّر عادةً بوليمرات اللّدائن بأنها سلاسل رخوة عشوائية التوجه متشابكة معاً كطبق المعكرونة (السبَكيتي) المطبوخة. وهذه صورة دقيقة تماماً عندما تكون البوليمرات في المحلول أو طَور الصُهارة. إلا أن فئة خاصة من البوليمرات ذات السلاسل الطويلة والصلبة تُبدي مناطق من الانتظام المتوازي في الحالة السائلة. والصورة المعبّرة تعبيراً جيداً عن هذه البوليمرات هي حزم الأخشاب المربوطة معاً الطافية على سطح الماء. ويُظهر المشهد المكبَّر مناطق يصطف فيها كثير من تلك الحزم جنباً إلى جنب، ومناطق مجاورة، تكون الحزم مصطفة فيها

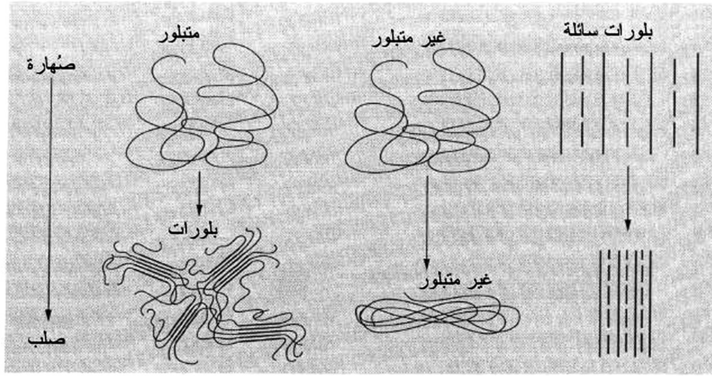
باتجاهات أخرى. وتكشف النظرة الإجمالية عن كثير من المناطق المنتظمة التي يأخذ كل منها اتجاهاً عشوائياً بالنسبة إلى الأخريات.

### فئات البوليمرات

تُصنَّف البوليمرات على أنها إما حرارية التصليد أو حرارية التلدُّن، وذلك بناءً على استجابتها للتسخين. لا يمكن إعادة تسخين المصلَّدات حرارياً أو إعادة قولبتها لأنها تخضع إلى تفاعل بلمرة غير عكوس مكوّن من مرحلتين. في المرحلة الأولى، يجري تكوين بوليمر سلاسل خطية ذات زمر طرفية (End Groups) تفاعلية. وفي المرحلة الثانية، يُخضَع البوليمر للتسخين في أثناء القولبة، وهذا يجعل مجموعات النهاية تتشابك معاً. وتُشكِّل السلاسل القصيرة ذات التشابكات الكثيرة مصلَّدات حرارياً، وتُشكِّل السلاسل الطويلة ذات التشابكات القليلة مصلَّدات أشدّ مرونة. ويؤدّي تعريض البوليمر إلى حرارة عالية مدة طويلة إلى تدنّي خواصه بتكسير سلاسله.

على النقيض من ذلك، يمكن إعادة قولبة المتلدّنات حرارياً لأنه يمكن إعادة صهرها حين تسخينها حتى ما فوق درجة حرارة معيّنة. فهي تتكوَّن من سلاسل جُزَيئات خطية مع بعض التشعب، من دون تشابك أو مع قليل من التشابك. والمتلدّنات حرارياً التي تتصف بمجال واسع من أطوال السلاسل سهلة المعالجة، في حين أن تلك ذات المجال الضيق فتتصف بخواص أكثر تجانساً.

وتتصف البوليمرات الحرارية التلدُّن عموماً بمقاومة صدْم أعلى، وهي أسهل معالجة وأكثر ملاءمة للتصاميم المعقّدة من البوليمرات الحرارية التصليد. وتُقسم البوليمرات الحرارية التلدُّن إلى ثلاث مجموعات بناءً على بنيتها الجُزَيئية: غير متبلورة، أو نصف متبلورة، أو بلّورات سائلة (انظر الشكل 11 ـ 1).




**الشكل 11 ـ 1: تمثيل ثنائي الأبعاد لبنى حرارية التلدن متبلورة ولامتبلورة وبلورية سائلة[2].**

تمتلك البوليمرات غير المتبلورة سلاسل عشوائية الاتجاهات في كل من الطَورين المصهور والصلب. وتتكوَّن البوليمرات شبه المتبلورة من سلاسل عشوائية الاتجاهات في طَور الصُهارة، لكنها تنتظم جزئياً بالتبريد معطيةً بنية ذات مناطق متبلورة وأخرى غير متبلورة.

وتتصف البوليمرات شبه المتبلورة بلزوجة صُهارة أضعف من لزوجة البوليمرات غير المتبلورة، وببنية جُزَيئية أشدّ تراصاً، إضافةً إلى أن القطع المُقَوْلَبة منها أكثر قابلية للتقلّص والاعوجاج. أما بوليمرات البلّورات السائلة فهي شديدة الانتظام في كلا الطَورين، المصهور والصلب. وتتصف هذه المجموعة من البوليمرات بقابلية ممتازة للمعالجة تؤدّي إلى تقليص مدة تلك المعالجة، وبزيادة قابليتها للانسياب في المقاطع الضيقة، إضافةً إلى الإمكانات الاستثنائية في الحصول على الأبعاد نفسها في النُسَخ المختلفة من القطعة نفسها. وتتصف القطع المُقَوْلَبة منها بالتقلّص والاعوجاج

القليلين، مع استقرار أبعاد عالٍ حتى حين تسخينها إلى درجات حرارة تساوي 200 ـ 250 مْ. إن الطبيعة القضيبية الصلبة لجُزَيئات بوليمرات البلّورات السائلة تؤدّي إلى بنية ميكرويّة تشابه التوجه الفيزيائي للألياف في البوليمرات الحرارية التلدُّن المقوّاة بالألياف (انظر الجدول 11 ـ 1).

**الجدول 11 ـ 1**: مقارنة البوليمرات الحرارية التلدُّن[2].

| غير متبلورة | نصف متبلورة | بلّورات سائلة |
|---|---|---|
| من أمثلتها: البولي أريلات، أكريلونيتريل ـ بوتادين ـ ستيرين، البولي كربونات، البولي سلفون، البولي إيثر إيميد | من أمثلتها: البولي إستر، البولي كبريتيد الفينيلين، البولي الإيميد، البولي أسيتال | من أمثلتها: البولي إسترات المشتركة التامة العطرية |
| لا توجد درجة حرارة انصهار دقيقة، بل ليونة تدريجية. سلاسل عشوائية التوجّه في الطَورين الصلب والمصهور. | درجة حرارة انصهار محدَّدة نسبياً. ترتيب جُزَيئي منتظم، وتكرار منتظم للبنية الجُزَيئية في الطَور الصلب. | مجال انصهار. حرارة انصهار منخفضة. استمرارية كبيرة للسلاسل. بنية جُزَيئية شديدة الانتظام في الطَورين الصلب والمصهور. |
| لا تنساب بسهولة انسياب النوعين الآخرين. | انسياب سهل عند درجة تزيد على درجة حرارة الانصهار. | انسياب جيد بالقص أو حول مجال الانصهار. |
| التقوية تحسِّن قابليتها للتحميل تحت درجة الحرارة $T_g$ فقط. | التقوية تقلل اللاتناحي وتُحسِّن قابليتها للتحميل بين درجتي الحرارة $T_g$ و$T_m$. | التقوية تحسِّن قابليتها للتحميل خاصة في الأشكال الشديدة التبلور بين درجتي الحرارة $T_g$ و$T_m$. |
| يمكن أن تُعطي قطعاً شفافة. | القطع معتمة عادة | القطع معتمة دائماً. |

$T_g$ درجة حرارة الانتقال الزجاجي التي يكون البوليمر مطاوعا فوقها وهشا تحتها$T_m$ . نقطة الانصهار.

## فئات بوليمرات البلّورات السائلة

أهم ثلاث فئات لبوليمرات البلّورات السائلة هي البولي إيميدات العطرية (Aromatic polyamides)، والبوليمرات القضيبية الصلبة،

والبولي إسترات المشتركة العطرية. وهي جميعاً تشترك بسهولة توجيهها، التي تؤدّي إلى درجة عالية من الانتظام، وبمُعَامل يونغ عالٍ. وباستخدام الماركة التجارية المسجلة[5][3] (Kevlar)، جرى أول تسويق تجاري لبولي إيميدات عطرية سوائلية التبلور (ليوتروبية (Lyotropic)) هي البولي بارا فينيلين تيرِفتالْ إيميد Poly (p-phenylene terephthalamide). تُنتَج البولي إيميدات العطرية (الأراميد) بسيرورة النفث الجاف والغزل المبلول حيث تؤدّي البنية الخيطية (النيماتيكية) في المحلول إلى أدائها الممتاز الشهير. ويمكن معالجة تباينات البنية بالتطرية عند درجات حرارة مرتفعة مع قليل من الشد، وهذه آلية تُعرَف بأنها تزيد من معامل يونغ في الليف نتيجة اصطفاف الجُزَيئات القريب من المثالي. لقد أعطى إنتاج ألياف البولي إيميد العطرية التجارية زخما للكثيرين لمحاولة معالجة بوليمرات البلّورات السائلة لتحويلها إلى ألياف ذات معامل يونغ عال.

والبوليمرات الشبيهة بالقضبان هي فئة أخرى من الألياف السوائلية التبلور، وتُنتَج أيضاً بسيرورة النفث الجاف والغزل المبلول. والبولي بارا فينيلين بنزو بيستيازول (Poly(p-phenylenebenzo-bisthiazole) أشدّ البوليمرات المنتظمة تعقيداً، صعب المعالجة، إلا أنه يتصف بأكبر معامل مرونة من بين جميع ألياف بوليمرات البلّورات السائلة التي أُنتجت حتى الآن[11][6].

أحد التحديات الرئيسة في برنامج وكالة الفضاء الأميركية للجيل القادم من عربات الإطلاق القابلة لإعادة الاستخدام هو تصميم خزان وقود من مادة مركَّبة خفيفة الوزن وتعمل عند درجات حرارة منخفضة. وعلى منظومات الحاضنة الراتنجية المرشحة لهذا الغرض أن تتصف بمُعَامل تمدّد حراري منخفض، ومقاومة ميكانيكية جيدة، وبخواص عزل حرارية ممتازة عند درجات الحرارة الشديدة

الانخفاض وهي محمَّلة. يُضاف إلى ذلك أن على منظومة الراتنج أن تكون قابلة للمعالجة بتقنيات غير تقنيات المِحمَّات، ومنها الشي في الخلاء، وقولبة الراتنج بالنقل والحقن، وقولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية، ونقع غشاء الراتنج، التشكيل بالسحب، والتوضيع بالجر (Tow Placement) المتطور.

ولتحقيق هذه المتطلبات، طوَّر مركز بحوث لانغلي التابع لوكالة الفضاء الأميركية طائفة جديدة من أوليغومرات البلّورات السائلة التامة العطرية التي يمكن معالجتها وتشبيكها حرارياً مع الاحتفاظ بانتظام بلّوراتها السائلة. وجرت بلمرة كل المونومرات بوجود وحدة قابلة للتشبيك باستخدام تقنية تكثيف صُهارة ودودة للبيئة. لا تتطلب هذه الطريقة مذيبات خطرة، وناتجها الثانوي الوحيد هو حمض الخل. ويمكن الحصول على الناتج النهائي، ذي عمر الخزن اللامحدود، على شكل مسحوق أو حُبيْبات. وتُصهر الأوليغومرات الناتجة لتصبح طوراً خيطياً (نيماتيكياً)، إلا أنه لا توجد درجات حرارة تجعلها متناحية أعلى من درجات حرارة تفكّكها. وقد صُمِّمت ثلاث صيغ عطرية واختُبرت هي الإسترات، والأيميدات ـ إستر (Ester-amides)، والإيميدات ـ إستر (Ester-imides).

إحدى المزايا الرئيسة لهذه الطريقة، المسمّاة راتنجات مركز بحوث لانغلي البلّورية السائلة[12] (Langley Research Center-Liquid Crystal Resin)، هي إمكان التحكُّم بمجموعة متنوعة من الخصائص الراتنجية، ومنها درجة حرارة الانصهار، واللزوجة، وكثافة التشابك في القطعة النهائية. وبناءً على الصيغة، يمكن تحضير الأوليغومرات بلزوجة صُهارة في المجال بين 10 و000 10 بواز (100 راد/ ثا)، ويمكن معالجة صُهارتها باستخدام تقنيات معالجة المواد المركَّبة المختلفة. تؤدّي هذه الإمكانية إلى صنع حاضنات راتنجية

بمواصفات وفق الرغبة تلبّي ظروف المعالجة المطلوبة لتصنيع مواد مركَّبة نسيجية. بمجرّد وضع الراتنج في الوعاء، تُرفع درجة الحرارة حتى 375 مْ، فتتشابك الأوليغومرات لتعطي شبكة خيطية (نيماتيكية) ذات درجة حرارة انتقال زجاجي عالية من دون إطلاق مواد متطايرة. أما الخواص الميكانيكية للقطع الناتجة التامة التشابك فتضاهي تلك التي للمواد المركَّبة الشائعة التي تقوم على راتنجات الإيبوكسي المتوافرة تجارياً.

يمكن استخدام راتنجات لانغلي البلّورية السائلة أيضاً في تقنيات التشكيل الحراري حيث يُرغب في مدد قصيرة للتشكيل. ويمكن استخدامها لغزل الألياف، وتكوين أغشية رقيقة وصفائح، أو قولبة قطع معقّدة الأشكال بالحقن. صحيحٌ أن هذه الراتنجات قد طُوِّرت لتلبي احتياجات وكالة الفضاء الأميركية الخاصة بتطوير الجيل القادم من مركَبات الإطلاق، إلا أنه يمكن النظر في استخدامها في تطبيقات أخرى أيضاً. فخواص هذه المادة الحرارية والميكانيكية تُعتبر مثالية للتطبيقات الإلكترونية، ويمكن استخدامها في الدارات المرنة، وتعليب الرقاقات الإلكترونية، وحشوات سفلية توضع تحت الرقاقات التي تلحم على الدارات مباشرة. وثمة مجال آخر لاستخدامها هو صناعة السيارات، حيث توجد حاجة ملحة للاستقرار الحراري والمقاومة الكيميائية. فأغطية موزِّعات شمعات الاحتراق، وخزانات الوقود، ومجاري سحب الهواء، وأغطية الصمّامات الهزازة، ونظم الإشعال تمثّل بعض التطبيقات في السيارات. وتجعل لزوجة هذا الراتنج الضعيفة منه مادة مثالية لتطبيقات الطلاءات أيضاً. فقد استُخدمت مساحيق ناعمة منه في تطبيقات البخ بالبلازما حيث تم الحصول على طلاءات رقيقة جيدة. ويمكن استخدامه لاصقاً أيضاً. يُضاف إلى ذلك أنه قد تحقّقت فيه بسهولة مقاومة قص اللاصق (Lap Shear) تساوي 22.683 ميغا باسكال. بالمقارنة، هذه القيمة

تساوي 20 ضعفاً تقريباً من تلك التي لراتنجات البلّورات السائلة المتوافرة تجارياً.

وثمة فئة لافتة أخرى هي بولميرات البلّورات السائلة غير المحشوة (الصرفة)[13]. تتصف هذه الراتنجات باستقرار أبعاد واستقرار حراري ممتازين، إضافة إلى الصلابة الشديدة ومقاومة الشدّ والمقاومة الكيميائية الكبيرتين. ويمكن قولبة القطع المصنوعة منها بدقة كبيرة، وهي مقاومة للنيران، ولا تمتص إلا قليلاً من الرطوبة، وكتيمة جداً لتسرب للغازات، وتتحمل درجات الحرارة الشديدة الانخفاض من دون أن تُصبح هشة، وتتصف بعامل تمدّد حراري منخفض.

وهي تتصف أيضاً بمزايا معالجة كثيرة. حين معالجة صُهارة هذه البوليمرات، تصطف جُزَيئاتها في اتجاه تدفّق الصُهارة لتكوِّن قشرة سماكتها تساوي عادة 30 ـ 15 في المئة من سماكة القطعة. وهذا يُسهم في مقاومة الصُهارة العالية للشدّ والاستقرار الجيد، والتدفّق الجيد تحت القص، والتقلُّص الضعيف والقابل للتوقّع (انظر الجدول 11 ـ 2). وتقوِّي البنية الموجَّهة المادة النهائية معطية إياها مقاومة كبيرة للشدّ والثني، ومعامل مرونة عالٍ، واستقرار جيد للأبعاد.

والمادة المعالَجة تكون عموماً لامتناحية، لذا تكون مقاومة الشدّ ومُعَامل يونغ في اتجاه الانسياب أعلى، برغم أن بعض المنتجات التي تُحشى تكون عادة أقل لاتناحياً. ويمتد مجال تطبيقات راتنجات البلّورات السائلة الصرفة من المكوِّنات التي تقولب بالحقن، حتى الأغشية المنفوخة أو المصبوبة، أكانت وحيدة الطبقة أو بصيغة بثق مشترك، حتى الصفائح المبثوقة والقطع المقولبة بالنفخ والحقن. ويمكن أيضاً مزج راتنجات البلّورات السائلة الصرفة مع بوليمرات أخرى لتحسين انسيابها وجساءتها وخواصها الأخرى.

**الجدول 11 ـ 2**: مزايا بوليمرات البلّورات السائلة[13].

| المزايا في الاستخدام النهائي | مزايا المعالجة |
| --- | --- |
| استقرار حراري ممتاز. التحمُّل الحراري حتى 240 مْ. | تقلّص واعوجاج ضعيفان جداً في أثناء القولبة. |
| قساوة ومقاومة شدّ عاليتان. معامل يونغ عادة من 10 حتى 24 جيغا باسكال، ومقاومة شدّ من 125 حتى 255 ميغا باسكال، ومقاومة خدش بالصدم من 5 حتى 85 كيلو جول/ متر$^2$. | قابلية استثنائية لتكرار الإنتاج بالمواصفات نفسها. |
| تغيّر أبعاد ضئيل. مُعَامل التمدّد الحراري أصغر من $10\times10^{-6}$/مْ في اتجاه الانسياب، وامتزاز رطوبة أصغر من 0.03 في المئة. | مقاومة صُهارة للشدّ كبيرة واستقرار عالٍ. |
| تتحمَّل البرودة الشديدة. تحتفظ بـ 70 في المئة من قيمة مقاومتها للخدش بالصدمة عند برودة تصل حتى ـ 270 مْ. | لزوجة صُهارة منخفضة تسمح بتدفّق سريع في المقاطع الضيقة والقطع المعقّدة. |
| مقاومة كيميائية ممتازة. خاملة تجاه الأحماض والمبيِّضات والمذيبات العضوية المكلورة والكحولات والوقود. | حرارة انصهار منخفضة تسمح بانصهار وتبريد سريعين. |
| معدّلات تسريب للغاز منخفضة مقارنةً بأغشية التغليف التجارية. | جساءة عالية عند درجات الحرارة المرتفعة. يمكن إعادة معالجتها مرات كثيرة من دون تغيّر ملحوظ في خواصها. |
| انتزاع ضعيف للشوارد، يقل كثيراً عن المطلوب في البيئة العديمة التآكل في تطبيقات رقاقات الدارات المتكاملة. | زوائد قليلة أو معدومة. |
| إعاقة متأصلة للهب، وكثافة دخان منخفضة، ونواتج احتراق عديمة السُميَّة نسبياً. | |

## أشكال بوليمرات البلّورات السائلة

إن بوليمرات البلّورات السائلة، العادية والصرفة، والتي هي من البولي إستر وإيميد البولي إستر التشاركي التَّامة العطرية، تتصف بمقاومة كيميائية وبخواص ميكانيكية أفضل من تلك التي للبوليمرات الحرارية التلدُّن المقوّاة بالألياف الزجاجية. يُضاف إلى ذلك أن استقرار أبعادها، وخواص عزلها للحرارة، في أشكالها المختلفة، من أغشية وصفائح وألواح، تضاهي أو تفوق تلك التي لمعظم البوليمرات الأخرى القابلة للمعالجة وهي مصهورة.

لقد قيّدت درجة حرارة المعالجة العالية لبوليمرات البلّورات السائلة العادية (يحصل الانتقال الحراري عند 280 ـ 335 مْ) استخدام هذه الراتنجات إلى حد ما، خاصة في المزائج والخلائط مع البوليمرات ذات درجات حرارة التشكيل المنخفضة. وقد تم تجاوز هذه الحالة من خلال التطوّرات الأخيرة في بوليمرات البلّورات

السائلة المكوّنة من بولي إسترات تشاركية تامة العطرية والإستر إيميد، التي تنخفض فيها درجة حرارة الانتقال الحراري حتى 220 مْ.

باستثناء درجة حرارة المعالجة، تتصف بوليمرات البلّورات السائلة، المنخفضة درجة الحرارة والعادية، بالخواص نفسها الميكانيكية والمقاومة الكيميائية والاستقرار وغيرها من الخواص الأخرى. وبوجه عام، تعمل بوليمرات البلّورات السائلة التامة العطرية (المغلقة الحلقة) على نحو أفضل من تلك التي تحتوي على مكوّنات أليفاتية مفتوحة السلسلة.

**الأغشية والبُنى المتعدّدة الطبقات (Films and Multilayer Structures)**: تلائم أغشية وصفائح بوليمرات البلّورات السائلة كثيراً من التطبيقات الطبية والكيميائية والإلكترونية على نحو جيد، إضافة إلى حفظ المشروبات والأطعمة. فهي أشدّ كتامة لبخار الماء والأُكسجين وغاز ثاني أُكسيد الكربون والغازات الأخرى من راتنجات حفظ الأغذية المعتادة. وحين توجيه غشاء بوليمر البلّورات السائلة في المحورين، يشكِّل مادة شديدة المقاومة للشدّ مع خواص متجانسة نسبياً وتليُّف منخفض. ويمكِّنه تحمُّله لدرجات الحرارة العالية من تحقيق احتياجات التطبيقات ذات المتطلبات الحرارية، ومن أمثلتها أغشية الدارات المطبوعة.

وفي تطبيقات الحفظ الكتيم تتفوّق راتنجات بوليمر البلّورات السائلة في أدائها حتى على اللّدائن التي تتصف بمفعول جيد من حيث النفوذية المنخفضة لبخار الماء والأُكسجين، ومن أمثلتها البوليمر المشترك إيثيلين ـ كحول الفينيل والبولي ثنائي كلوريد الفينيليدين. ويمكن لأغشية بوليمر البلّورات السائلة أن تكون أرق من تلك التي للبوليمرين المذكورين عند مستوى الكتامة نفسها، وهذا ما يجعلها مكوِّنات مجدية التكلفة للصفائح المتعدّدة الطبقات للحاويات

والصواني. ويمكن استخدام تلك الألياف أيضاً بوصفها أغشية كتيمة في خزانات غاز السيارات المقولبة بالنفخ، وبطائن للخزانات المعدنية واللّدائنية المستخدمة لخزن الوقود والمواد الكيميائية.

**الخلائط ومساعدات المعالجة (Blends and Process Aids):**

خُلطت بوليمرات البلّورات السائلة من البولي إسترات التشاركية التامة العطرية، والإستر إيميد، والبوليمرات الشاردية، مع كثير من البوليمرات الحرارية التلدُّن، ومنها البولي أوليفينات والبولي كربونات والبولي إسترات والبولي إيميدات والبولي إيثر إيميدات، وحتى مع راتنجات درجة الحرارة العالية غير المطاوعة كالبولي إيميدات. يُحسِّن هذا الخلط الراتنج القاعدي بزيادة جساءته ومقاومته للصدم والحرارة وكتامته لبخار الماء والأُكسجين والتصاقه بين المكوِّنات الصفيحية.

وفي إحدى الحالات، انخفضت لزوجة البولي كربونات، المخلوط مع بوليمر بلّورات سائلة عادي بنسبة 5 ـ 30 في المئة، بنحو 25 في المئة مقارنةً بلزوجته وحده. على سبيل المثال، تساوي لزوجة صُهارة البولي كربونات نحو 3000 بواز (عند بقائها مدة 1000 ثانية عند 290 مْ)، وحين خُلط مع 30 في المئة من بوليمر بلّورات سائلة عادي مصنوع من بولي إستر تشاركي، انخفضت لزوجته حتى نحو 2250 بواز. وزاد بوليمر البلّورات السائلة من معامل المرونة مع انخفاض سماكة الجدران. فقد أصبح معامل المرونة في جدار سماكته 0.8 مم، مصنوع من خليط من 70 في المئة من البولي كربونات و30 في المئة من بوليمر البلّورات السائلة، تساوي نحو 5100 ميغا باسكال، مقارنةً بنحو 2300 ميغا باسكال للبولي كربونات وحده.

وفي حالة أخرى، خُلط 5 ـ 15 في المئة من بوليمر بلّورات سائلة منخفض درجة الحرارة مع بولي أوليفينات. فكانت جساءة غشاء مصنوع بالنفخ من الخليط أكبر بعدة مئات المرات من جساءة غشاء مصنوع من البولي أوليفينات وحدها. يمكن التحكُّم بتوجيه

جُزَيئات البوليمر في هذه الأغشية بواسطة قالب حلقي متعاكس الدوران (Counter-Rotating Annular Die).

وتتغيّر أشكال وخواص خلائط بوليمر البلّورات السائلة مع تغيُّر نسبة الخلط، ومع طريقة المعالجة وموسّطاتها وغير ذلك من العوامل الأخرى. وهي تتأثر أيضاً بتوافق البوليمرات الأخرى وبالموفِّقات بينها. فنظراً إلى أن الموفِّقات يمكن أن تغيّر لزوجة الخليط وتوزُّعه والالتصاق في ما بين البوليمرات، فإن الخلائط قد تحتاج إلى استمثال مع بوليمر مشترك تعاقبي (Block Copolymer) ومُضافات أخرى تعدِّل انسيابية الصُهارة وتوتر ملتقيات مكوِّنات الخليط.

وحين استخدام بوليمرات البلّورات السائلة بمستويات منخفضة كمساعدات معالجة، فإنها تُحسِّن مقاومة الصُهارة وانسياب الراتنجات ذات الصُهارة المنخفضة والعالية درجة الحرارة في أثناء البثق. وهذا يجعل معالجة الأغشية والألياف أسهل، ويُحسِّن مقاومة الألياف للشدّ وجساءتها. وهي يمكن أن تُحسِّن أيضاً جساءة البولي أوليفينات وأن تخفِّض لزوجة البولي إيثر إيميد والبولي إيثر إيثركيتون والراتنجات اللزجة الأخرى العالية درجة الحرارة.

**الأغشية والألياف غير المنسوجة (Films and Nonwovens)**: تُغزل ألياف بوليمرات البلّورات السائلة من الصُهارة بطرائق بثق البولي إستر المعتادة. وتتصف هذه الألياف بمقاومة شدّ كبيرة وجساءة شديدة، لذا فإن شدّها بعد غزلها لزيادة مقاومتها للشدّ غير ضروري. ويمكن زيادة مقاومة الألياف المغزولة للشدّ كثيراً بالمعالجة الحرارية عند درجة تقل بنحو 10 ـ 20 مْ عن درجة حرارة انصهارها في جو خامل مدة تدوم من دقائق حتى ساعات عدة. وتتصف ألياف وخيوط بوليمرات البلّورات السائلة عادة بتماسك (Tenacity) يساوي 23 ـ 28 غرام ثقلي/ دِنير، وهذا يكافئ استطالة مقدارها 3.3 في المئة أو أقل، وبمعامل مرونة أولي (Initial Modulus) يساوي 585 غرام/ دِنير (انظر الجدول 11 ـ 3).

إن ألياف بوليمرات البلّورات السائلة أقوى بخمس مرات من ألياف الفولاذ المساوية لها بالوزن، وهي تحتفظ بقوتها على مجال واسع من درجات الحرارة، وتتصف بجميع مزايا بوليمرات البلّورات السائلة المعروفة، كالامتصاص الضعيف للرطوبة، والمقاومة الكيميائية العالية، ومُعَامل التمدّد الحراري القريب من ذاك الذي للزجاج، والتغيّرات الضئيلة للأبعاد مع تغيّر درجة الحرارة من مستويات شديدة الانخفاض حتى ما فوق 200 مْ.

ولا تعاني ألياف بوليمرات البلّورات السائلة من تشوّه زحف محسوس عند أحمال تصل حتى 50 في المئة من الحمل الذي ينقطع الليف عنده، وهي تُبدي مقاومة احتكاك جيدة في ما بين الألياف. ويتجاوز تحمُّلها للثني ذاك الذي للأراميد: بعد 1000 عملية ثني احتفظت خيوط بوليمر البلّورات السائلة بـ 93 في المئة من مقاومتها الأصلية للشدّ مقارنةً بـ 50 في المئة احتفظ بها الأراميد.

**الجدول 11 ـ 3**: خواص ألياف بوليمرات البلّورات السائلة[13].

| الأشكال والخواص الفيزيائية | الخواص الميكانيكية | الخواص الحرارية |
|---|---|---|
| فتيلة مستمرة رهافتها 25 ـ 3750 دنير | تماسك: 23 ـ 28 غ /دنير 2850 ـ 3470 ميغا باسكال | درجة حرارة الانصهار: 330 مْ |
| فتيلة رهافتها 5 دنير وقطرها 25 ميكرون | استطالة: 3.3 في المئة | تقلُّص في الماء الغالي ≥ 0.5 في المئة |
| ليف كثافته 1.4 غ/سم$^3$ | معامل مرونة أولي: 585 غ/دنير، 70 جيغا باسكال | تقلُّص في الهواء الساخن عند الدرجة 177 مْ= 0.5 في المئة |
| استعادة الرطوبة < 0.1 في المئة | | تركيز الأُكسجين الأدنى اللازم للاحتراق: قرينة الأُكسجين الحدية 30 |
| المستخلصات (بكلوريد الميثيل) < 0.1 في المئة | | مُعَامل التمدّد الحراري المحوري: 20 ـ 145 مْ: $-4.8\times10^{-6}$ م/مْ 145 ـ 200 مْ: $-14.8\times10^{-6}$م/مُ 200 ـ 290 مْ: $-26.7\times10^{-6}$ م/مْ |

ظروف الاختبار: طول القطعة المقاسة 25 سم، معدّل الانفعال 10 في المئة، 98 لفة/متر، عيّنة من خمسة ألياف، المِقيَس ASTM D885 لمعامل المرونة الأولي.

وهي تتصف أيضاً بمقاومة انقطاع ممتازة: 3.4 مقارنةً بـ 1.1 للأراميد و1.0 للبولي إيثيلين ذي الوزن الجُزَيئي الكبير جداً. وهي شفافة للأمواج الميكرويّة، ولم تتأثر عملياً بالتعرض لإشعاع كوبالت 60 مقداره 500 ميغا راد، وهي قادرة على تحمُّل التعقيم بأشعّة غاما. إلا أنها تتأثر بالأشعّة فوق البنفسجية، وتجب حمايتها من التعرّض المديد إليها بغطاء أو غشاء واق.

ثمة كثير من التطبيقات التخصُّصية لألياف بوليمرات البلّورات السائلة. فهي تُستخدم في ملابس وقفازات الوقاية من الجرح والطعن، وتتحمل عدة عمليات غسيل وتجفيف بوجود المبيّضات. بالمقارنة، مقاومة الأراميد للمبيّضات ضعيفة، وألياف البولي إيثيلين ذي الوزن الجُزَيئي الكبير جداً حساسة لدرجات الحرارة المرتفعة الموجودة في آلات تجفيف الثياب.

وحبال وكابلات ألياف بوليمرات البلّورات السائلة ملائمة لتطبيقات التربيط والتحزيم والجر، ويمكن استخدامها في صنع شباك صيد السمك، وحبال الإنقاذ في الحوامات، وحبال مظلات الهبوط من الطائرات، والنوى المركزية في الكابلات المقوّاة، ومكوّنات تقوية طولية للألياف الضوئية. وحيثما يكون الحيّز ضيقاً، يمكن إنهاء جدائل صغيرة من بوليمرات البلّورات السائلة بعرى نسبة قطر العروة فيها إلى قطر الجديلة تقترب من 1:1.

وفي الصناعة، تُستخدم ألياف بوليمرات البلّورات السائلة في الأحزمة المقاومة للحرارة، ومقويّات الأشرطة، وأوعية الضغط، والصمّامات وموانع التسرّب المقاومة كيميائياً. وهي تضيف خصائص ثني وطيٍّ ممتازة ومقاومة تمزق إلى الأقمشة المركَّبة منها التي تُستخدم في البُنى القابلة للنفخ. وهذا هو سبب استخدام بوليمرات البلّورات السائلة في البالونات التي هبطت بواسطتها بنجاح المركبة

Pathfinder على المريخ، وفي نظم مشابهة لكن أكبر منها، في مهمة Rover المريخية.

وفي التجهيزات الترفيهية، تُحسِّن ألياف بوليمرات البلّورات السائلة تخميد الاهتزازات وتحقِّق مقاومة استثنائية في مكوِّنات الدراجات وعصي الهوكي ومضارب التنس والغولف وأدوات التزلج على الثلج وعصي سنانير صيد السمك وأوتار الأقواس وأجسام القوارب وأشرعتها (استُخدمت في القوارب الشراعية في سباق كأس أميركا). وهي خاملة وغير سامة وتتحمل جميع طرائق التعقيم الشائعة، ولذا تُستخدم في تطبيقات طبية كالقسطرات وكابلات التحكُّم بالتجهيزات الجراحية.

## الخواص المؤثرة في تصاميم بوليمرات البلّورات السائلة

يكمن الفارق الكبير بين بوليمرات البلّورات السائلة والبوليمرات نصف المتبلورة الأخرى في البنية الجُزَيئية. إن البنية المنتظمة لبوليمرات البلّورات السائلة، الموجودة حتى في طَور الصُهارة، تؤثّر في خواص المادة وفي طرائق معالجتها. وبفهم أفضل لكيفية استجابة اللّدائن لعمليات القولبة، يستطيع المهندسون معالجة بوليمرات البلّورات السائلة باستخدام تقنيات معالجة الراتنجات نصف المتبلورة الأخرى نفسها.

يختار المهندسون بوليمر البلّورات السائلة عموماً بسبب استقرار الأبعاد والمتانة ورقّة الجدران المحضّرة منها وكذلك قابلية المعالجة باستخدام طيف واسع من الموسّطات. والتحدي هو تصميم القطع تصميماً صحيحاً للاستفادة من هذه الخصائص[14].

وإلى جانب اتباع طرائق التصميم الشائعة التي تضمن انسياب الراتنج الناعم والمتجانس، على المهندسين الاهتمام بلاتناحي

بوليمرات البلّورات السائلة، أي بالفرق بين خواصها في اتجاه الانسياب وفي الاتجاه المعامد له. ليس هذا السلوك جديداً على العاملين في قولبة اللّدائن. فكثير منهم عانى من صعوبات مشابهة في أثناء قولبة الراتنجات المقوّاة بالألياف الزجاجية. إن مفتاح التصميم الناجح هو تصميم سماكة جدار القطعة التي سوف تُشكَّل بالقولبة وموضع بوابة القالب بحيث يضمنان أن التدفّق لا يؤثّر في مقاومة القطعة المقولبة أو يسبب تقلصاً فيها غير مرغوب فيه. ومن معايير التصميم الأخرى التي يجب الاهتمام بها ما يأتي:

**التقلُّص (Shrinkage)**: من مزايا بوليمرات البلّورات السائلة إمكان المحافظة على سماحيات دقيقة. تعتمد درجة التقلُّص بعد القولبة على توجُّه الجُزَيئات في القطعة المقولبة، لا على ظروف المعالجة. فالتقلُّص في اتجاه التدفّق يقارب الصفر حيث تزداد التوجيهية. إلا أن التقلُّص في الاتجاه المعامد فيتغير من 0.0762 حتى 0.1270 مم/مم من أجل سماكة جدار بين 0.7620 و0.1750 مم، وهذا مستوى شائع في اللّدائن الهندسية العادية. لذا، وبغية درء الاعوجاج، على المصمّم ضبط تدفّق المادة في قالب القطعة للموازنة بين التقلُّص في اتجاه التدفّق والاتجاه المعامد.

**خطوط اللحام (Weldlines)**: تفْقِد القطع المصنوعة من بوليمرات البلّورات السائلة 50 في المئة من مقاومتها الكتلية عند خطوط اللحام أو الوصل. لذا يجب أن تُصمَّم القطع بحيث تكون مناطق الإجهاد الشديد بعيدة عن خطوط اللحام. ثمة حل آخر لجعل خطوط اللحام أصغرية هو تجنّب تعدّد البوابات في القوالب. فحين توفّر خصائص تدفّق جيدة، غالباً ما تكون البوابة الواحدة كافية في تصميم القالب.

لكن عندما تكون ثمة حاجة إلى بوابات عدّة، فيجب وضعها بحيث تصل مقدّمات الصُهارة المتدفقة معاً إلى مناطق الإجهاد

المنخفض. ومن الضروري أيضاً ترك حيّز لمقدّمات الصُهارة لتتدفّق معاً بعد تلاقيها. إن هذه السيرورة تؤدّي إلى ظهور درزة لحام. والحالة المعاكسة لها هي خط اللحام الناتئ. تتشكل درزة اللحام واللحام الناتئ عندما تقترب مقدّمات الصُهارة المتدفقة بعضاً من بعض من اتجاهين متقابلين وتقف حيث تلتقي. إن خطوط اللحام الناتئ تُخفِّض مقاومة القطعة حتى 20 في المئة من مقاومتها الكتلية. لذا، لتشجيع تكوُّن درزات اللحام، يجب توضيع البوابات بحيث تتشكل الخطوط حينما يبدأ القالب بالامتلاء بالراتنج ويستمر في التدفّق عبر خط اللحام.

**البوابات (Gates)**: معظم البوابات الشائعة تعمل جيداً مع بوليمرات البلّورات السائلة. على المصمّم أن يختار البوابة التي تتوافق مع شكل القطعة وتحقّق مقدمة تدفّق متوازنة. فالتحكُّم بالتدفّق من خلال موضع البوابة يساعد على استمثال الخواص الميكانيكية، خاصةً في مناطق الإجهاد الشديد.

وتؤثّر أبعاد البوابة أيضاً في جودة القطعة المقولبة. ينتفخ بوليمر البلّورات السائلة قليلاً حين انتقاله من البوابة إلى القالب، لذا يجب أن تساوي البوابة 90 ـ 100 في المئة من سماكة جدار القطعة. وفي ما يخص موضعها، فيجب تصميمها بحيث تكون مقابل نواة أو ضلع أو جدار فجوة بغية تغيير اتجاه تدفّق الصُهارة. فإذا لم تكن ثمة عوائق، انطلق الراتنج مباشرة ضمن القالب مشكِّلا بنية كبنية النوازل الكلسية في مغارة. إن هذه البنية الشبيهة بالحبلية، المسماة انبجاس، تُضعف القطعة بتكوينها لخطوط اللحام.

ويجب أن تسمح مواضع البوابات أيضاً بملء القالب على نحو متجانس من المقاطع السميكة إلى الرقيقة. وحينما يكون الاستواء مهماً، يُساعد موقع البوابة على السيطرة على الاعوجاج ومنع ظهور

فوارق في التقلُّص عبر القطعة بتوليد أنماط تدفّق معقّدة تغيّر توجيه التدفّق عبرها. في حالة التوجيه العشوائي، يكون تأثُّر الاستواء بالتقلُّص في الاتجاه المعامد لاتجاه التدفّق أقل.

**فتحات التهوية (Vents)**: يجب أن تحتوي القوالب على فتحات تهوية في مواضع عدة لدرء انحباس الهواء في أثناء الملء السريع. ونظراً إلى اللزوجة المنخفضة جداً لصُهارة بوليمر البلّورات السائلة، فإن الصُهارة سوف تملأ ثقوب التهوية إذا كانت أعمق من 0.0127 ـ 0.0254 مم.

**مجاري الصب (Runner System)**: تعمل مجاري الصبّ الدائرية تماماً أو شبه المنحرفة جيداً مع بوليمرات البلّورات السائلة. وفي حالة القوالب المتعدّدة الفجوات، يمكن لنظام مجاري صبّ جيّد التوازن أن يدرأ مشاكل الامتلاء الزائد وإخراج القطعة من القالب. إن بوليمرات البلّورات السائلة تعمل جيداً مع مجاري الصبّ الساخنة بسبب استقرارها الحراري. إلا أنه يجب عدم استخدام مجاري صبّ تزيد مقاساتها عن الضروري.

يستخدم العاملون في صبّ معظم البوليمرات الحرارية التلدُّن مجاري صب كبيرة لمعظم اللّدائن الحرارية لتسريع التدفّق ومنع التبلور قبل دخول المادة إلى القالب. أما بوليمر البلّورات السائلة، فتنساب بسهولة أكبر، ولذا لا تحتاج إلى مجاري الصبّ الكبيرة التي لا تؤدّي إلا إلى مزيد من هدر وتدوير المواد.

**القولبة (Molding)**: إلى جانب انسياب بوليمرات البلّورات السائلة في آلة القولبة بالحقن بسهولة، فهي تتصف بمدد قولبة قصيرة، وتعطي قطعاً منخفضة الإجهاد المتبقّي، مع قليل من الزوائد أو من دونها، وذات استقرار أبعاد كبير، ومتانة جيدة. أما مدد عملية

القولبة فتساوي عادةً 5 ـ 30 ثانية، اعتماداً على التصميم، وتلك مدة تساوي أقل من نصف مدة قولبة معظم اللّدائن الهندسية. يأتي قِصَر مدة القولبة من أن حرارة صهر المادة منخفضة، ولأن المادة تحتفظ ببنيتها المنتظمة حين انصهارها ولذا لا تحتاج إلا إلى مدة قصيرة للتبلور. إن هذه الصفات تجعل القطعة تبرد بسرعة، مقلصَّة المدة اللازمة لتخليصها من الحرارة، وتحقِّق الجساءة عند الحرارة المرتفعة. لذا يمكن إخراج القطعة من القالب وهي ما زالت ساخنة.

وتتطلب اللزوجة المنخفضة أيضاً ضغط حقن أقل، وهذا ما يساعد على خفض الإجهاد الناجم عن القولبة ومدة التبريد اللازمة لدرء الاعوجاج. إن لزوجة بوليمر البلّورات السائلة تجعله شديد الحساسية للقصّ. لذا يمكن تحسين تدفّق الصُهارة ضمن أجزاء طويلة ورفيعة بزيادة سرعة الحقن بدلاً من حرارة الصُهارة. ولهذه التقنية مزيتها لأنها تتجنب درجات حرارة الصُهارة العالية التي تؤدّي إلى عيوب سطحية كالبثور التي تجعل القطعة عديمة الفائدة.

ومن المهم ألا تُستخدم آلات تزيد أحجامها عما هو ضروري. إن البراميل الكبيرة المستخدمة في آلات القولبة تزيد من مدة بقاء الراتنج فيها بسبب احتوائها على كميات لعدة دفعات إنتاج، وهذا ما يجعل الراتنج يسخن حتى درجة أعلى مما يلزم. لذا، يستخدم المهندسون آلات صغيرة، أو قوالب متعدّدة الحجرات، لتقليص تلك المدة ودرء التسخين الزائد[15].

## كيفية تأثير الخواص في القولبة

تُعتبر بوليمرات البلّورات السائلة أسهل اللّدائن الجيدة المواصفات معالجة، ويعود هذا جزئياً إلى كون صُهارتها أشدّ الصُهارات تدفّقاً، وإلى كون مدد قولبتها أقصر مدد القولبة. ويمكن

معالجتها بالتجهيزات العادية بكل طرائق المعالجة الشائعة، ويمكن تركيبها مع جميع المقويات والحشوات. إن خواصها الفريدة تؤثّر في معالجتها من جوانب عدة مهمة[2].

يحصل الانخفاض الشديد في لزوجة صُهارة بوليمرات البلّورات السائلة لأن الجُزَيئات القضيبية الصلبة تمر جنباً إلى جنب بسهولة. لذا يسمح انسيابها الشديد بملء الأجزاء المعقّدة والجدران الرقيقة عند ضغط حقن منخفض نسبياً. صحيحٌ أن الضغط يختلف باختلاف تصميم القطعة وطريقة توضع القالب وإعدادات الآلة، إلا أنه يقع عموماً في المجال 7 ـ 35 ميغا باسكال، وهذا ضغط أخفض كثيراً من الضغوط في حالات الراتنجات الأخرى. ويؤدّي انخفاض الضغط إلى انخفاض إجهاد القولبة، ولذا ليست ثمة حاجة إلى إطالة مدة التبريد لدرء الاعوجاج الذي ينجم عن مثل هذا الإجهاد.

أما مدد قولبة بوليمرات البلّورات السائلة فتساوي عموماً نصف مدد قولبة الراتنجات الجيدة الأخرى: 10 ـ 30 ثانية مقابل 20 ـ 60 ثانية أو أكثر. وتعتمد مدة قولبة القطعة على عوامل كالحجم والشكل والسماكة والتوضُّع وإعدادات الآلة.

إن أحد أسباب مدة القولبة القصيرة هو أن هذه البوليمرات تستطيع الانتقال بسرعة بين الطَورين المصهور والصلب لأنهما يتصفان ببنيتين منتظمتين متشابهتين. إن البنية الميكرويّة الشبيهة بالقضيبية في الحالتين تقصّران المدة اللازمة لصهر الراتنج قبل الحقن ومدة تصلُّده ضمن القالب.

وتسهم عوامل كثيرة أخرى متأصلة في بوليمرات البلّورات السائلة بمدة القولبة القصيرة. فاللّزوجة المنخفضة تسرِّع ملء القالب، وتسمح الجساءة الجيدة عند درجات الحرارة المرتفعة بلفظ القطعة

من القالب وهي ما زالت ساخنة. وانخفاض إجهادات القولبة يلغي الحاجة إلى التبريد البطيء لدرء تكوُّن الإجهاد.

يُعرَّف الترقُّق الناجم عن القص (Shear Thinning) بأنه انخفاض لزوجة الصُهارة نتيجة زياد إجهاد القصّ. إن بوليمرات البلّورات السائلة أشدّ حساسية للترقُّق الناجم عن القص من اللّدائن الهندسية الأخرى، وهذه صفة جيدة تمكِّن من تغيير التدفق، وبواسطتها يمكن تحسين مقدرة الراتنج على ملء القطع الطويلة والرفيعة والشديدة التعقيد بزيادة سرعة الحقن. أما في حالة البوليمرات الأخرى، فتجب زيادة حرارة الصُهارة لخفض اللزوجة، وهذا يمكن أن يؤدّي إلى تفكّك البوليمر.

ويخفِّض تدوير المواد التكاليف والهدر لأنه يمكن إعادة طحن الزوائد والتوالف وإعادة استخدامها. إن بوليمرات البلّورات السائلة المدوَّرة تحتفظ بمعظم خواص الراتنج الأصلي باستثناء مقاومة الصدم في الأنواع المحشوة بالزجاج المطحونة بسبب انكسار الألياف. عملياً يمزج المصنِّعون 50 في المئة من المواد المدوَّرة مع 50 في المئة من الراتنج الأصلي.

## الخواص الأخرى

تتصف بوليمرات البلّورات السائلة بمجموعة استثنائية من الخواص. فسلاسلها شبه القضيبية تعمل كالألياف في تقوية بعضها بعضاً. لذا تمتاز هذه البوليمرات بمقاومة شدّ وجساءة نادرتين. وتتجاوز جساءتها عند 200 مْ جساءة كثير من الراتنجات الهندسية الأخرى عند درجة حرارة الغرفة. وهي تبقى متينة حتى حين غمرها بالنيتروجين السائل.

وتقاوم هذه الراتنجات معظم الأحماض والأسس والمذيبات،

حتى عند درجات الحرارة العالية. ويبلغ امتصاصها للماء عند درجة حرارة الغرفة نحو 0.2 في المئة، ويساوي في بعض الأنواع المحشوة نحو 0.1 في المئة، من دون أن يحصل تغيّر فعلي في الأبعاد. وظهر على بوليمرات البلّورات السائلة بعض الحوَّار الأبيض بعد سنة من التعرض في العراء إلى مناخ حار، وحصل تدنٍّ طفيف في الخواص بعد 1000 ساعة من الغمر بماء درجة حرارته 121 مْ.

أما ثابت العزل الكهربائي (Dielectric Constant)، ومقاومة الحقل الكهربائي (Dielectric Strength)، والمقاومة الكهربائية الحجمية (Volume Resistivity)، ومقاومة الانفراغ الكهربائي (Arc Resistance)، في بوليمرات البلّورات السائلة فتساوي أو تفوق تلك التي للبوليمرات المتقدمة الأخرى، ضمن طيف واسع من ظروف التشغيل. وتتجاوز خواص الكتامة فيها أيضاً تلك التي للبوليمرات التي تُعالج مصهورة.

## معالجة بوليمرات البلّورات السائلة

تحت تأثير القصّ (في القولبة والبثق وغزل الألياف)، تنزلق شلل البوليمر بعضاً على بعض كالمعكرونة الجافة، مع انخفاض لزوجة الصُهارة كثيراً. وتصطف مجموعات الجُزَيئات مكوِّنة حزماً صلبة من الجُزَيئات الموجَّهة باتجاه الانسياب، مؤدية إلى خواص شديدة اللاتناحي. تشابه هذه الحزم القضيبية ألياف التقوية وتعمل مثلها، ومن هنا يأتي الاسم المستعار «البوليمرات الذاتية التقوية» (أو القضيبية الجساءة).

إلا أن ثمة اختلافات كثيرة في مدى سهولة معالجة بوليمرات البلّورات السائلة. ويعود هذا إلى تراكيب وحدات المونومرات التي يتكوَّن منها فقار البوليمر. صحيحٌ أن هذه البوليمرات تكتسب

جساءتها ومناعتها الحرارية وخطيتها من البُنى الحلقية العطرية الصلبة في السلسلة الرئيسة، إلا أنها يجب أيضاً أن تتضمّن وصلات مرنة أو فواصل مسافة بين تلك المجموعات العطرية كي تكون قابلة للمعالجة في طَور الصُهارة. ويتكوَّن هذا الجسر عادة من وصلة من الإستر في بوليمرات البلّورات السائلة التجارية (مع أنه قد جرى تركيب أنواع كثيرة من الوصلات بنجاح) تعطي السلسلة مزيداً من حرية الحركة، ومن ثَمَّ معالجة صُهارة أسهل.

ومقارنةً بالصُهارات الشديدة اللزوجة لبعض الراتنجات المتقدمة، فإن معالجة بوليمرات البلّورات السائلة سهلة. فانتقالها إلى طَور الصُهارة ذي المحتوى الحراري المنخفض يولِّد بعض التبلور، وتجري صُهارتها كالماء حين سكبها. وهي تملأ قوالب القطع الرقيقة الجدران بسهولة (لا تقل سماكتها عن $10^{-3}$ إنش) وتتقولب بسرعة مع تقلُّص ضئيل واستقرار أبعاد جيد.

والشيء الجيد هو أن لزوجة هذه البوليمرات المنخفضة تُسهِّل مزجها بما يصل إلى 50 في المئة من الزجاج أو التالك أو أي حشوة أخرى، وهذا ما يُساعد على تقليل اللاتناحي فيها. لكن برغم أن الجُزَيئات الموجهة تعطي قوة، إلا أن الكثير من الأشياء الجيدة يمكن أن يُضعف الخواص العرضانية وخطوط اللحام. من ناحية أخرى، تقل تكلفة الحشوات كثيراً عن تكلفة بوليمرات البلّورات السائلة الصافية.

ويمكن لمعالجة بوليمرات البلّورات السائلة في الحقول المغنطيسية أن تؤدّي إلى زيادة مقاومتها للشدّ بضعفين أو أكثر، وفق رأي العاملين في مختبرات لوس ألاموس الوطنية، الذين كانوا يعملون أيضاً مع الصناعة على تطوير طريقة لاستخدام الحقل المغنطيسي لإنتاج مواد مركَّبة ثلاثية الأبعاد. يوجِّه الحقل ألياف التقوية في اتجاه محور الإحداثيات ص[16].

وطوَّر معهد البحوث التقنية المحلي في أوساكا[17] وأنتج لدائن مقواة قابلة للتدوير تحتفظ بمقاومتها للشدّ حتى بعد 5 عمليات تدوير. لقد احتوت اللّدائن المقوّاة بالألياف حتى الآن على ألياف زجاجية، وكانت غير متوافقة مع سيرورة التدوير التي كانت الألياف الزجاجية تتكسر فيها. وخرَّب الزجاج أيضاً آلات البثق والقولبة بالحقن. لذا استُخدمت في تقوية اللّدائن بوليمرات البلّورات السائلة بدلاً من الألياف الزجاجية، وتحصل هذه التقوية في أثناء المعالجة.

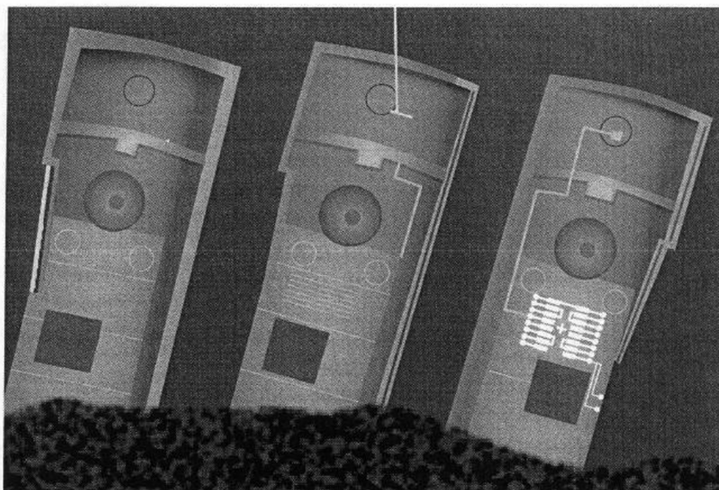
استُخدم في عملية الإنتاج راتنجات لدائن هندسية من البولي إيثيلين ترفتالات (Polyethylene terephthalate) أو البولي بوتيلين ترفتالات (Polybutylene terephthalate) كحاضنة بوليمرية. وكانت نسبة هذين الراتنجين الوزنية إلى بوليمر البلّورات السائلة تساوي 70 في المئة للأول و30 في المئة للثاني. وعُجن مقدار كبير من المزيج عند 280 مْ لتكوين كريات صغيرة باستخدام الباثق الثنائي اللولب. وجرت قولبة مقدار صغير من الكرات (عُشر الكمية الكلية) بالحقن لتحضير عيّنات لقياس خواصها الميكانيكية. ثم بُثِقت الكرات المتبقّية جميعاً ثانيةً في الظروف نفسها، وجرت قولبة مقدار صغير منها بالحقن لتحضير مجموعة ثانية من العيّنات المدورة. وكُرِّرت عملية البثق والقولبة وتحضير العيّنات عشر مرات. في عمليات التدوير تلك المتمثلة بالبثق، تحوَّل بوليمر البلّورات السائلة إلى ألياف حتى عملية التدوير الخامسة، وتحوَّل إلى قُطَيرات بدءاً من العملية السادسة. تسمّى المنتجات المصنوعة حتى عملية التدوير الخامسة عادة «مواد مركَّبة محلية». وجرى قياس الخواص الميكانيكية وغيرها للعيّنات التي أُنتجت بهذه الطريقة.

كانت مقاومة الشدّ في أول عيّنة مدوَّرة 93 ميغا باسكال، وهذه قيمة تساوي نحو 1.8 مرة من تلك التي لراتنج البولي إيثيلين

ترفتالات الصافي. وبقيت قيمة مقاومة الشدّ نفسها حتى العينة الخامسة. وكانت نتائج مزيج الراتنج البولي بوتيلين ترفتالات مشابهة أيضاً[18]. من التطبيقات المحتملة لهذه المواد المركَّبة علب أجهزة التلفاز والحواسيب وأحواض الاستحمام.

وكانت ثمة رغبة قديمة في توضيع خطوط ناقلة كهربائياً، مباشرة على بُنى لدائنية مقولبة، تضم الوظائف الكهربائية والميكانيكية في قطعة واحدة لتكوين حامل دارة مقولب بالحقن. وقد تحقَّقت هذه التقانة بتطبيق سيرورة التشكيل الليزري المباشر (Laser Direct Structuring) (LDS) التي طورتها شركة تصنيع الدارات المطبوعة LPKF على مادة معدلة من بوليمرات البلّورات السائلة من شركة ®Vectra[19]. حينئذٍ يمكن للغلاف الإلكتروني أن يحل محل بطاقات الدارات المعتادة، وهذا يدفع بالتصغير إلى الأمام. إن هذه التقانة ملائمة لتجهيزات الاتصالات النقالة ومساعدات السمع وتقانة مُحِسَّات السيارات الإلكترونية، على سبيل المثال لا الحصر.

تتألف سيرورة الليزر هذه من عدد أصغري من خطوات التصنيع: قولبة بالحقن، وتشكيل ليزري، وطلي معدني (انظر الشكل 11 ـ 2). من حيث المبدأ، تقولب القطعة في قالب عادي باستخدام مادة بوليمرية يمكن أن تُفعَّل ليزرياً، ثم تُرسم أشكال التوصيلات المرغوب فيها مباشرة على القطعة المقولبة باستخدام نظام ليزر أشعّة تحت الحمراء ثلاثي الأبعاد من الشركة Microline، وتطلى المسارات الناقلة باستخدام تقانة الطلي الصناعي اللاكهربائية المعتمَدة من شركة .Enthone Inc[19]. ويلتصق الطلاء حيث يُفعَّل البوليمر بالليزر. وفقاً للدقة المتوافرة حالياً، يمكن الحصول على عرض للخط أكبر من 150 ميكرون. وبسبب مقاومة بوليمر البلّورات السائلة لدرجات الحرارة العالية، فإن خطوط الدارة المتشكِّلة عليها قابلة للحام بالقصدير.



**الشكل 11 ـ 2: حوامل دارات مقولبة بالحقن أُنتِجت باستخدام سيرورة التشكيل الليزري المباشر على بوليمر بلورات سائلة معدل. تُسهِّل هذه الحوامل تصغير الإلكترونيات بضم الوظائف الإلكترونية والميكانيكية معا في مكوِّن واحد.**

يتكوَّن نظام ليزر الأشعّة تحت الحمراء الثلاثي الأبعاد هذا من المنبع الليزري $Nd:VO_4$ لتفعيل سطح البوليمر، وماسح غلفاني يقود حزمة الليزر على كامل سطح القطعة الثلاثية الأبعاد. وتتألف مادة بوليمر البلّورات السائلة من لدائن عادية ومُضافات ومعقّدات معدنية قابلة للانشطار بالليزر.

## تطبيقات بوليمرات البلّورات السائلة

يتمثل الاختراق الرئيس لبوليمرات البلّورات السائلة للسوق الاستهلاكية بتجهيزات الطبخ المزدوجة الاستخدام. ومن التطبيقات الأخرى في الأدوات المنزلية المقابض والمماسك ومكوّنات أفران الأمواج الميكرويّة. لقد طُوِّرت بوليمرات البلّورات السائلة لاستخدامها في أجهزة الطبخ بالأمواج الميكرويّة، وطُوِّرت راتنجات

Xydar لاستخدامها المزدوج في كل من تجهيزات الطبخ في فرن الأمواج الميكرويّة والفرن Tupperware. إلا أن ارتفاع أسعار بوليمرات البلّورات السائلة، ومنافستِها من قبل الراتنجات الأخرى، حدًّا من نمو هذه السوق.

وتتمثل تطبيقاتها في الطائرات والمركبات الفضائية بالبراشيم والزعانف الحركية الهوائية وقبب الرادارات في مقدمات الصواريخ والقنابل الذكية. ومن الاستخدامات في النقل أغطية الهياكل الداخلية، ونظم تداول الوقود، والمكوّنات الكهربائية حيث تتطلب درجات حرارة العمل المتزايدة أداء أفضل.

وتعمل بوليمرات البلّورات السائلة كألياف تقوية في أغشية البولي إيثيلين لزيادة أعمار مناطيد الهيليوم التي تستخدمها وكالة الفضاء الأميركية للتجارب في الغلاف الجوي. يبلغ قطر المنطاد نحو 200 متر، وهو يحمل ما يصل إلى 3500 كغ من الحمل المفيد، ويرتفع حتى 40 كيلو متراً. وتبقى مناطيد الهيليوم في الجو مدة يومين أو ثلاثة أيام فقط، وترغب وكالة الفضاء الأميركية بإطالة مدة بقائها لتصل إلى شهرين أو ثلاثة أشهر، أو حتى سنوات.

يمكن لزيادة الضغط الداخلي في المناطيد، التي لم تُضغط سابقاً، أن يطيل مدة التحليق، إلا أن البولي إيثيلين وحده ليس قوياً بقدر يجعله يتحمل الضغط. لذا اشتملت عملية التطوير على صنع بولي إيثيلين مقوًّى بألياف بوليمر بلّورات سائلة. لكن الألياف نزعت إلى الاصطفاف في اتجاه تدفّق الصُهارة مقوِّية الغشاء في ذلك الاتجاه فقط.

يتمثل أحد حلول هذه المشكلة بصفيحة ذات طبقتين متعامِدَتَي الألياف. والطريقة الأخرى هي استخدام قالب حلقي متعاكس الدوران. حينئذٍ وفي أثناء تشكيل الغشاء بالبثق، تتوجه الألياف التي في خارج الغشاء في اتجاه، وتتوجه التي في داخله معامدةً لها.

ويمتزج البولي إيثيلين مع بوليمر البلّورات السائلة في أثناء السيرورة، ويصبح بوليمر البلّورات السائلة معلقاً على شكل قطرات في البولي إيثيلين. وتستطيل القطرات من خلال تمريرها عبر مسار متضيِّق، ثم تتجمد في ذلك الشكل بتبريد المزيج حتى درجة تقل عن درجة تجمّد بوليمر البلّورات السائلة (200 مْ)، لكن فوق درجة تجمّد البولي إيثيلين (120 مْ). ثم يُبثق المزيج في قالب الدوران المتعاكس ليُعطي غشاء سماكته تساوي نحو 20 ميكرون.

من تطبيقات هذه الأغشية، في الكهرباء والإلكترونيات والاتصالات، عوازل الأسلاك والمآخذ الشديدة الكثافة وأغلفة الثنائيات المشعّة للضوء والوشائع ومشكِّلات الملفات وتطبيقات أخرى مهمة.

إن بوليمرات البلّورات السائلة ممتازة لصنع مآخذ وحوامل الرقاقات الإلكترونية، والمقابس وعلب المبدّلات والمكثفات، وذلك لأنه يمكن قولبة جدران رقيقة لعزل الدبابيس التي تفصلها مسافات قصيرة من دون الإساءة إلى العزل الكهربائي. وأهم من هذا، تتصف بوليمرات البلّورات السائلة بأعلى درجة حرارة تشوّه تحت الحمل (Heat Deflection Temperature) بين جميع اللّدائن الحرارية. وهي تتصف أيضاً بأعلى استقرار للأبعاد، وتتحمَّل اللحام بالأشعّة تحت الحمراء ولحام الطَور البخاري. وظهور أنواع منها قابلة للطلاء يفتح الباب أمام لوحات الدارات المطبوعة والوحدات المتعدّدة الرقاقات. وقد نظر المصمِّمون أيضاً في استخدام بوليمرات البلّورات السائلة في مكيّفات الهواء العالية الجهد الكهربائي، والأدوات المنزلية الصغيرة، والآلات المكتبية.

وهي من بين كثير من المواد التي تُستخدم في المُحِسَّات والمعالِجات الإلكترونية التي توضع تحت أغطية السيارات. فهي لا تقاوم الحرارة فحسب، بل إن مقاومتها الكيميائية تجعلها ملائمة لبيئة

مزائج وقود البنزين والكحول وأدخنتها المسببة للتآكل. وقد تجعلها خواصها الميكانيكية ملائمة للقطع الصغيرة من آلية نقل الحركة ونظام الوقود في السيارات. ومن التطبيقات الأخرى في السيارات مكوّنات نظم الوقود والإشعال ونقلِ الحركة ومقابس المصابيح والعواكس والمثبّتات الحلقية ومشكِّلات الوشائع والمُحِسَّات ومكوّنات المحرّكات.

ومن تطبيقاتها الصناعية المكوِّنات الميكانيكية ذات الأبعاد الدقيقة في سوّاقات الأقراص الحاسوبية ومشغِّلات الأقراص المتراصّة وتجهيزات الصوت والصورة الأخرى. أما تطبيقات المقاومة الكيميائية، ومنها المضخّات والعدّادات والخراطيم، فهي إما في قيد التطوير أو في قيد التسويق. يُضاف إلى ذلك أن الصناعة الكيميائية تستخدم في حشوات أعمدة التقطير بوليمرات البلّورات السائلة لأن أسعارها ممتازة مقارنةً بجودتها. وثمة مآخذ الألياف الضوئية وقوارنها ومواد تصليدها قيد الإنتاج، حيث يمكن جعل مُعَامل التمدّد الحراري القابل للتحكّم به متوافقاً مع الليف الزجاجي أو أجزاء النظام الأخرى.

أخيراً، في صناعة التجهيزات الطبية، حل بوليمر البلّورات السائلة محل الفولاذ العديم الصدأ في عدد متزايد من أدوات الجراحة وصواني التعقيم، لأنه يمكن أن يُقولب في أشكال طويلة معقّدة، ويستطيع تحمُّل دورات التعقيم المتكررة[20].

وتشق بوليمرات البلّورات السائلة طريقها إلى مزيد من التطبيقات الطبية بسبب مقاومتها الكيميائية الممتازة. ومن أمثلتها حاقن سنِّي جديد يتحمَّل المواد الكيميائية القوية المستخدمة في التعقيم. وقد ألغى الانتقال من البولي أريل سولفون (Polyarylsulfone) إلى بوليمر البلّورات السائلة 2 في المئة من المرتجعات التي كانت تحصل بسبب التصدّع الناجم عن التعقيم المتكرر. فالبولي أريل سولفون

يضعف بعد 500 ـ 1000 عملية تعقيم، أما بوليمر البلّورات السائلة فيتوقع أن يتحمل 2000 عملية على الأقل. إن بوليمرات البلّورات السائلة ملائمة لكثير من تطبيقات التجهيزات والأدوات الطبية والسِّنية والمخبرية، ومنها المماسك وصواني الأدوات الجراحية والسنية وتجهيزات المستشفيات وغرف العمليات.

ثمة ثماني درجات تجارية من بوليمرات البلّورات السائلة من شركة Vectra مرشحة للاستخدام في التجهيزات الطبية، منها تعليب الأدوية ونظم التزويد بالدواء. ويمكن بثقها أو قولبتها بالحقن، وهي تتصف بمواصفات تدفّق مختلفة تُعطي قطعاً قليلة الاحتكاك والاهتراء، وبمظهَر حسن ومتانة كبيرة. وهي تتحمَّل الحرارة العالية والتعقيم المتكرر والمواد الكيميائية. ويمكن أن تحل محل المعادن، وأن تُعطي قطعاً ناعمة البنية لنظم التزويد بالدواء، وأن تُستخدم في الجراحة التنظيرية وفي مجالات أخرى.

وتحقِّق تلك المواد المواصفات التي تنصّ عليها الفئة VI من المقياس 23 من مقاييس هيئة المقاييس الصيدلانية الأميركية من حيث التوافق مع الجلد والدم والنُسُج. وهي تحقِّق أيضاً التعليمات الأوروبية 2002/72/EC الخاصة بالتماس مع الأغذية، ومقاييس الهيئة الاتحادية الألمانية لتقييم المخاطر في ألمانيا[21].

## الشبكة المتداخلة

### تقديم

تتكوَّن بوليمرات الشبكة من تشابك بوليمر متجانس خطّي مع بوليمر متجانس خطي آخر باستخدام تقنيات التطعيم. بالمقارنة، تتكوَّن الشبكات المتداخلة (Interpenetrating networks) من بوليمرين، أو

أكثر، في حالة تشابك من دون وجود روابط مشتركة بينها، وهي غالباً ما تكون بوليمرات غير متوافقة على شكل شبكة. إلا أن واحداً منها على الأقل يتبلمر أو يتشبَّك بوجود الأخريات بجواره مباشرة، وهذا ما يؤدّي إلى أن تكون سلاسلها متشابكة تماماً[25][22].

تُعتبر الشبكات المتداخلة منظومات متباينة الخواص مكوَّنة من طَور مطّاطي وآخر زجاجي، وأحد هذين الطَورين يكون عادة راتنجاً هجيناً. ويؤدّي هذا التركيب إلى تضافر الخواص الميكانيكية معطياً إما مقاومة صدم شديدة أو تقوية، وكلاهما يعتمد على استمرارية الطَور. وبناءً على تركيبها، يمكن أيضاً تحسين خواصها الحرارية.

## أنواع الشبكات المتداخلة

**ثمة أربعة أنواع منها:**

● **شبكات متداخلة تعاقبياً**: تبتدئ هذه الشبكات ببوليمر واحد مشبَّك فعلاً. ثم ينتبج بإضافة مونومر آخر مع بوادئ وعوامل تشبيك، ويُترك النظام ليتبلور في مكانه. مثال: بوتادين متشابك مع ثنائي فينيل البنزن يشكِّلان البوليمر الأول. ويُضاف إلى الناتج ستيرين وثنائي فينيل البنزن وبوادئ ملائمة، فيتبلمر النظام معطياً شبكة متداخلة.

● **شبكات متداخلة آنياً**: تتكوَّن هذه الشبكات من مزيج متجانس من المونومرات والبوليمرات الأولية والبوليمرات الخطية والبوادئ وعوامل التشبيك. وتحصل البلمرة بتفاعلات مصمّمة لتكون مستقلة وغير متداخلة. مثال: يحصل تبلمر أولي للبوليمر التشاركي المكوَّن من اليوريتان/ ميثيل ميثاكريلات والبوليمر التشاركي المكوَّن من اليوريتان/ ستيرين، ثم يُحلَّان معاً ويُخضعان للتفاعل لتكوين شبكة متداخلة.

• **أشباه الشبكات المتداخلة**: تتكوَّن هذه الشبكات من بوليمر خطي واحد مع بوليمر مشبَّك. مثال: اليوريتان/ سليكون مع سليكون/ بولي إيميد.

• **الشبكات المتداخلة المتجانسة**: تحضَّر هذه الشبكات من بوليمرات متماثلة الأصل لكنها تحتفظ بخصائص معيّنة حينما تتبلمر معاً. مثال: شبكات الإيبوكسي/ إيبوكسي المتداخلة.

## سيرورات الشبكات المتداخلة

طوَّر باتر (Pater) وسميث (Smith) ورازون (Razon)، من مركز بحوث لانغلي، طريقة جديدة لصنع شبكات متداخلة وأشباه شبكات متداخلة تتصف بمتانة كبيرة إزاء التصدّعات ومقاومة كبيرة للتشقّقات الميكرويّة[26].

كانت الشبكات المتداخلة تُصنع عادة باستخدام مذيب عام لمكوِّنين عضويين مختلفين، ثم يُبخَّر المذيب. يمكن أن تكون لواحد من المكوِّنين زمر أغطية انتهائية قابلة للتفاعل، وهذا يُنتج شبه شبكة متداخلة، أو لكليهما، فتنتُج شبكة متداخلة تامة. وفي أثناء عملية التبخير، ينفصل الأوليغومر عن البوليمر بسبب اختلاف قابليتهما للانحلال مع زيادة تركيز المحلول. لكن الخاصية الترموديناميكية لقابلية انحلال المكوِّن، مع إزالة المذيب، تؤثّر تأثيراً كبيراً في فصل الأطوار، ولذا في البنية الميكرويّة للشبكة.

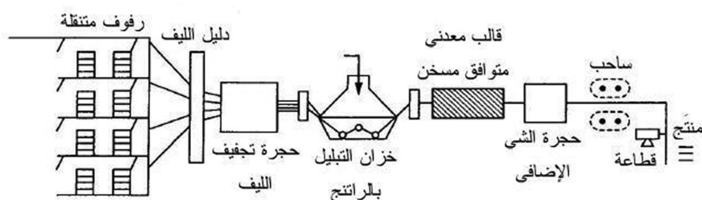
أما الطريقة الجديدة فتتضمّن التجفيف بالتجميد. يُزال المذيب بإزالة الطاقة بسرعة من السائل عند درجة حرارة المحيط، فيبرد محلول الأوليغومر والبوليمر ليصبح صلباً بسرعة كبيرة. حينئذٍ تكون الحالة الترموديناميكية للمكوِّنين العضويين في المادة الصلبة غير مستقرة.

ويمكن للمذيب الملائم لسيرورة التجفيف بالتجميد أن يكون صلباً أو سائلاً أو غازياً عند درجة حرارة وضغط الجو المحيط. على سبيل المثال، أول وثالث وخامس الترايوكسان هو مذيب صلب ممتاز لسيرورة التجفيف بالتجميد. فهو يتسامى بسهولة عند درجة حرارة الغرفة وعند ضغط أخفض من ضغط الجو المحيط، ويمكن أن يذيب كلاً من الأوليغومر إيميد الحراري التصلُّد والبولي إيميد، الحراري التلدُّن، بصيغة حمض الأميك. أما المذيبات السائلة الملائمة فهي كثيرة. وثاني أُكسيد الكربون هو مثال لمذيب غازي ملائم.

في تجربة تحكُّم، جرى تكوين شبكات متداخلة وأشباه شبكات متداخلة بحل المكوّنات في مذيب آخر شائع وفق الطريقة العادية. واختُبرت الراتنجات الصافية والمواد المركَّبة المُنتجة بالطريقة العادية وبطريقة التجفيف بالتجميد. وفي الحالتين، بيَّنت درجات حرارة الانتقال الزجاجي وبيانات الاختبارات الميكانيكية الديناميكية للشبكات المتداخلة وأشباه الشبكات المتداخلة أن طريقة التجفيف بالتجميد أعطت شبكات من النوعين ذات مواصفات محسَّنة جداً.

وأعلن تشن (Chen) وما[27] (Ma) تطويرهما طريقة لصنع مواد مركَّبة بطريقة سحب ألياف شبكات متداخلة مكوَّنة من البولي ميثيل ميثاكريلات/ بولي يوريتان. وقد بيَّنا في دراستهما الإمكانية العملية لسحب مواد مركَّبة من البولي ميثيل ميثاكريلات/بولي يوريتان مقواة بالألياف، وبيَّنت دراسة اللزوجة، أن درجة الحرارة المثلى للبوليمر التمهيدي لشبكات البولي ميثيل ميثاكريلات/ بولي يوريتان تقع في المجال 40 ـ 60 مْ تقريباً. ولوحظت قابلية تفاعل عالية في البوليمر التمهيدي في دراسات مدة تكوُّن الهلام عند درجات حرارة مرتفعة (فوق 160 مْ). وبينَّت دراسة الأشكال القائمة على صور المجهر

الماسح الإلكتروني أنه قد حصل تشريب ألياف جيد في راتنج البولي ميثيل ميثاكريلات/ بولي يوريتان. واستنتجا من دراساتهما أن هذه البوليمرات التمهيدية تلائم سيرورة سحب شبكات البولي ميثيل ميثاكريلات/ بولي يوريتان (انظر الشكل 11 ـ 3).




**الشكل 11 ـ 3: مخطط آلة سحب ألياف**

لقد ازدادت مقاومة الثني ومعامل الثني والقساوة في مواد الشبكات المتداخلة مع زيادة نسبة البولي ميثيل ميثاكريلات. إلا أن مقاومة الصدْم ونسبة الانتفاخ انخفضتا مع زيادة البولي ميثيل ميثاكريلات[27].

## تطبيقات الشبكات المتداخلة

تُستخدم بوليمرات الشبكات المتداخلة اليوم بكثافة في شتى أنحاء العالم كلواصق وحشوات كتيمة للأعمال الإنشائية، ومنها اللواصق التي تُطبَّق في حالة الصُهارة التفاعلية الحارة، وحشوات الزجاج المعزول الجديدة.

تُعدُّ شبه الشبكة المتداخلة القائمة على بوليمر حراري التلدُّن المضمَّن في شبكة يوريتان واحدة من المواد المطوَّرة في الولايات المتحدة وأوروبا وآسيا. يُحقِّق دهان اليوريتان خواص التصلُّد

الرطب، ولذا يتصلَّد المركَّب النهائي في مكانه باعتباره صُهارة ساخنة مقاومة للحرارة ذات مقاومة كبيرة للشدّ، مع انسياب بارد منخفض. واقتُرحت تجهيزات دهان ملائمة لضمان أن المركَّب يبقى مستقراً وخالياً من الرطوبة في أثناء تطبيقه، وأن ثمة ماء كافياً بعد الطلاء لتحقيق التصلُّد الرطب.

تجمع المنتجات المصنوعة من بوليمرات الشبكات المتداخلة بين مُعَامل يونغ العالي، والخواص الحرارية للحاضنة الإنشائية الحرارية التلدُّن، وخواص التزليق والتحرير الجيدة في السليكون. أما ما يمكن أن يكون الحسنة التجارية الكبرى لهذه الشبكات فهي التقلُّص والاعوجاج الضئيلان حين القولبة.

توفِّر شبكة متداخلة، مصمّمة لسوّاقة شريط رقمي عالي الجودة، السيطرة الكافية على الاعوجاج واستقرار الأبعاد اللازمين لتحل هذه المادة محل حامل السوّاقة المصمَّم في الأصل من البولي كربونات المقوّى بألياف الكربون.

تتكوَّن الشبكة عادة من مركَّب ناقل للشحنات الساكنة يقوم على بولي إستر حراري التلدُّن مع تقوية بألياف الكربون وتزليق بالتفلون. تتصف هذه المادة بمعاملَي احتكاك واهتراء منخفضَين، وهي تحقِّق جميع متطلبات الخواص الأخرى باستثناء واحدة، هي الاعوجاج الأصغري.

بتعديل الشبكة المتداخلة الأصلية ببولي إستر حراري التلدُّن، مع 15 في المئة من السليكون/التفلون و30 في المئة من ألياف الكربون، انخفض اعوجاج القطعة بعد القولبة بمقدار 22 في المئة، وأُنتِج حامل يحقق متطلبات مقاييس الوثوقية القاسية. وقبل الإنتاج التجاري، أُخضعت عدة مجموعات حامل/رأس لاختبارات صارمة تضمّنت 000 100 عملية قراءة وكتابة من دون إخفاق.

## سيراميكات الأطوار المتداخلة

تستخدم سيرورة صنع سيراميكات الأطوار المتداخلة (Interpenetrating Phase Ceramics)، التي طُوِّرت في مدرسة كولورادو للمناجم، الاحتراق الآني المحلي الوحيد المرحلة لتحضير مواد مركَّبة كثيفة ذات تكلفة مقبولة.

تضمّن سيرورة سيراميكات الأطوار المتداخلة شبكة معدنية مطاوعة في حاضنة سيراميكية مسامية مستمرة. فيوفِّر السيراميك الخواص الميكانيكية المتقدمة، ويقلِّل المعدن الهشاشة. الفريد في إنتاج هذه السيراميكات هو استخدام التحضير العالي درجة الحرارة الذاتي الانتشار لتكوين جميع مكوّنات المادة المركَّبة في الوقت نفسه. ويحقِّق تطبيق ضغط التصليد، مباشرة قبل أو بعد عملية التحضير تلك، النظام الكثيف.

لقد استخدم المطورون هذه التقنية لصنع $TiC\text{-}Al_2O_3$ و$TiC\text{-}Al_2O_3\text{-}Al$ و$TiC\text{-}Al_2O_3\text{-}Ti$. فإضافة الـ $Al_2O_3$ تُخفِّض درجة حرارة الاحتراق وتضبط حجم الجُسيْمات والكثافة (اللذين يحسِّنان عندئذ الجساءة ومقاومة الضغط). حتى بوجود الـ $Al_2O_3$، فإن التفاعل الناشِر للحرارة يولِّد حرارة تكفي لتسرُّب الـ Al في السيراميك وتشكيل شبكة معدنية مطاوعة. والنتيجة هي مادة مركَّبة يُتوقَّع أن تكون منخفضة التكلفة[28].

## الهوامش


1. P. Savage, «Market Forecast: Liquid Crystal Polymers (LCP),» *High- Tech Mater. Alert, Technical Insights* (22 December 1995), pp. 2-5.

2. A. Kaslusky, «Liquid Crystal Polymers, A Primer,» *AM&P* (December 1993), pp. 38-41.
3. A. Kerai, *Japan Chemical Week*, 1 (11 November 1985).
4. A. S. Brown, ed., *High-Tech MatLs. Alert*, 3(6) (4 June 1986).
5. T.-S., Chung, *Polym. Eng. Sci.,* 26, 901, 1986.
6. E. Baer, E. and A. Moet, *High Performance Polymers* (Munich: Hanser Publishers, December 1990), p. 329.
7. C. E. McChesney and J. R. Dole, «Higher Performance in Liquid Crystal Polymers, *Mod. Plast*. (January 1988), pp. 112-118.
8. T.Stevens, «The Unusual World of Liquid Crystal Polymers,» *ME* (January 1991), pp. 29-32.
9. L. K.English, «The New Look of LCPs,» *ME* (June 1989), pp. 29-33.
10. P. Teague, «Liquid-Crystal Polymers Produce Liquid Assets,» *Des. News* (24 October 1994), pp. 48-51.
11. D. Frost, «Vectra Liquid Crystal Polymers,» *AM&.P* (July 1994), pp. 13, 16.
12. Dingemans, T., [et al.], «Liquid-Crystal Thermosets, A New Generation of High-Performance Liquid-Crystal Polymers, *NASA Tech Briefs* (February 2004), pp. 42-43.
13. L. Sawyer [et al.], «Unfilled Liquid Crystal Polymers,» *AM&P* (June 2001), pp. 61-63.
14. C. McChesney, D. A. Bowers and A. Kaslusky, «Resin Selection for High Connectors,» *SMT* (May 1996), pp. 70-74.
15. C. McChesney, J. Dole and M. Brand, «Flat Connectors, Right Out of the Mold,» *Mach. Design* (9 October 1997), pp. 108-116.
16. *AM&P* (February 1994), p. 49.
17. «Recyclable Liquid Crystalline Polymer-Reinforced Plastics,» *JETRO* (March 1996), p. 29.
18. *JPRS Rept*. (June 1994), p. 53.
19. T. Leggett, «Laser Direct Structuring & Liquid Crystal Polymer Simplify Circuit Miniaturization, Photonics Tech Brief,» (January 2004), pp. 12a-13a.
20. M. J. Braeckel, «Liquid-Crystal Polymers Cut the Cost of Medical Equipment,» *Mach. Design* (10 December 1998), pp. 60-66.

21. «Medical-Grade Liquid Crystal Polymers,» *Mach. Design* (18 September 2003), p.146.
22. U. A. Sorathia, W. L. Yeager and T. L. Dapp, Interpenetrating Polymer Network Acoustic Damping Material, Dept. of the Navy, Washington, D. C.
23. Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT, April 1994.
24. Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT, June 1994.
25. R. H. Pater, Tough, Process able Simultaneous Semi-Interpenetrating Polyimides, NASA, Hampton, VA, Langley Research Center, p. 14.
26. R. H. Pater, R. E. Smith and R. T. Razon [et al.], «Freeze-Drying Makes Improved IPN and Semi-IPN Polymers,» *NASA Tech Brief* (May 1993), p. 29.
27. C.-H. Chen, and C. M. Ma, «Pultruded Fiber-Reinforced PMMA/PU IPN Composites - Processability and Mechanical Properties,» *Composites Part A, Applied Sci. and Manufacturing*, 28 (1) (1997), 65-72.
28. «Interpenetrating Phases Form Low-Cost Ceramic Composites,» *High- Tech Matls. Alert*, Tech Insights, Inc., (17 November 1995), pp. 10-11.

## المراجع

Baird, D. G., Processing Studies on In Situ Composites Based on Blends of Thermotropic Liquid Crystalline Polymers with Thermoplastics, Virginia Polytechnic Inst. and State University, Blacksburg. VA, *NTIS Alert,* 95(20),5, 1995.

Chik, G. L., R. K. Y. Li and C. L. Choy. «Properties and Morphology of Injection Molded Liquid-Crystalline Polymer /Polycarbonate Blends.,» *J. Mater. Proc. Technol.*: 63(1-3), 488-493, 1997.

«Conductive Polymers Ready for Commercial Use, High- Tech Matls. Alert.,» *Tech Insights*: 24 June 1996, pp. 1-2.

Dole, J. R. «LNP and IPN.,» *SAMPE Journal*: July/ August 1986, pp. 134-136.

Downs, R. «LCP «Micro-Parts,» Cut Costs.,» *Mod. Plast.*: November 1995, p. 92.

English, L. K. «The New Look of LCPs.,» *ME*: June 1989, pp. 29-33.

Gagne, J. «Liquid Crystal Polymers.» *Plast. World*: July 1992, p. 57.

Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT, *NTIS Alert,* p. 31, June 15, 1995.

Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT, *NTIS Alert*: 15 June 1995, p. 11.

Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT, *NTIS Alert*: 15 October 1993, p. 47.

Klempner, D. and K. C. Frisch (eds.). «Advances in Interpenetrating Polymer Networks, Polymer Technologies.,» University of Detroit: vol. 3, 1991, p. 283, and vol. 4, 1994, p. 363.

Langerand, P. «Dupont Joins Field of LCP Players.,» *Mod. Plast.*: July 1994, p. 48.

LCP, *Mod. Plast.*: January 1995, p. 54-55.

Li, J. X. [et al.], Morphology and Mechanical Properties of Fibers from Blends of a Liquid Crystalline Polymer and Poly - ethylene Terephthalate), Case Western Reserve University, Cleveland, OH, Jn. *I. Appl. Polymer Sci.*: 44, 1531-1542, 1992; *NTIS Alert*, 96 (3), 28, 1996.

Magnuson, B. «LCP Fibers for High-Performance Needs.,» *ME*: June 1989, p. 10.

McChesney, C E. and J. R. Dole. «Higher Performance in Liquid Crystal Polymers.,» *Mod. Plast.*: January 1988, pp. 112-118.

Myers, J. and S. Moore. «As Electronics Get Smaller, Resin Specs Get Tougher.,» *Mod. Plast.*: March 1994, pp. 60-61.

«New, Higher-Performance Plastic Tubing.,» *Av. Week & Sp. Technol.*: 13 May 1996, p.13.

O'Brian, J. «LCPs: Heat Resistant, Tough, and Moldable.,» *Plast. World*: November 1985, p. 65.

Owens, J. O. «Adoption of Recyclable Liquid Crystal Polymer FRP. «June 27, 1994, p. 12.

*Plastics Technology*: July 1994, p. 21, 104.

«Semi-Interpenetrating Polymer Network (IPN) Type Ultrafiltration (UF Membrane), P.1 http://www.yet2.com/app/utility/external/indextechpak/28871, 7/7/03.

Singh, J. J., R. H. Pater and A. Eftekhari.,» Microstructural Characterization of Semi-Interpenetrating Polymer Networks by Positron Lifetime Spectroscopy, NASA, Hampton, VA, Langley Research Center.,» *NTIS Alert*: 97(14), 1996.

Stevens, T. «The Unusual World of Liquid Crystal Polymers.,» *ME*: January 1991, pp. 29-32.

Teague, P. «Polymer Housing Surpasses Tight Connector Tolerances.,» *Des. News*: 8 July 1996, p. 25.

Teague, P. Liquid-Crystal Polymers Produce Liquid Assets.,» *Des. News*: 24 October 1994, pp. 48-51.

«Thermoplastic Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT,» *NTIS Alert*: vol. 96, no. 21, 1 November, 1996, p. 74.

«Thermoplastic Interpenetrating Polymer Networks, NERAC, Inc., Tolland, CT.,» *NTIS Alert*: I5 September 1994, p. 31.

XU, Q. W., H. C. Man and W. S. Lau, «Melt Flow Behavior of Liquid-Crystalline Polymer In-Situ Composites." *J. Mater. Proc. Technol.*: 63 (1-3), 519-523, 1997.

# 12

## السيرورات والتصنيع

### تقديم

يقرُّ معظم الناس أن المثل الإيسوبي(*) القديم الشائع، «بالتأنّي والثبات تكسب السباق»، ينطوي على خطأ. فدعوته الصارخة إلى الجد في العمل تتجاهل حقيقة أن ومضة وحي يمكن أن تدفع بعمل باحث ليتقدم على أعمال الآخرين. وتكمن البراعة حينئذٍ في اغتنام الفرصة وإتّباع لحظة الإلهام بالقدر الملائم من التحضير والمتابعة.

إلى جانب الكثير من العمل الجاد، تتضمّن معظم التطوّرات التي تحصل في المعالجة والتصنيع والإنتاج بعض الومضات الإلهامية، بأفضل معانيها. المزيج الناجم عن الابتكار والتحسين المستمر هو تماماً اللازم لإبقاء مجالات معالجة المواد التقانية وتطويرها تتقدَّم بسرعة مطَّردة.

### سيرورات المواد المركَّبة

سيرورة جافة لحاضنة البولي إيميد وألياف الكربون والبورون: شريط الليف.

(*) المثل (Slow and Steady wins the Race) المنسوب إلى مؤلف قصص الحيوانات الإغريقي Aesop الذي عاش بين عامي 620 و564 ق.م.

اختُرعت سيرورة جافة لتكون وسيلة جيدة لصنع أشرطة من مواد مركَّبة مقوّاة تتكوَّن من حواضن، من راتنج البولي إيميد الحراري التلدُّن، مقوّاة بألياف الكربون والبورون. تُستخدم هذه الأشرطة لصنع مكوِّنات إنشائية من مواد مركَّبة قوّية وخفيفة الوزن (خاصة في صناعة الطائرات). إنّ إضافة ألياف البورون تحقِّق مقاومة ضغط أكبر مما يمكن تحقيقه باستخدام ألياف الكربون وحدها[1].

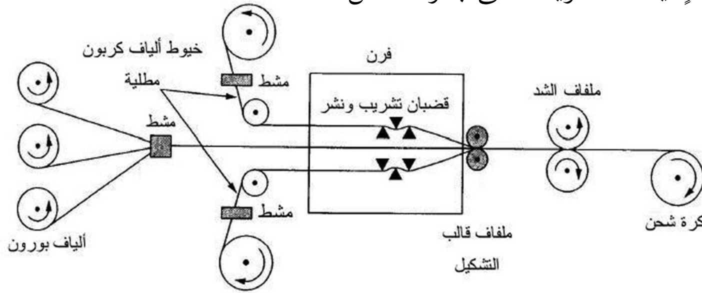
كانت أشرطة البولي إيميد وألياف الكربون والبورون تُصنع حتى الآن بسيرورة مبتلة: تُوضَّع ألياف البورون على شريط أولي التقوية مبتل مكوَّن من ألياف كربونية مطلية براتنج البولي إيميد في محلول. وفي خطوة التوضيع هذه، تُدفَع ألياف البورون، ذات الأقطار الكبيرة نسبياً عادةً، جزئياً فقط في الشريط المبلول الأولي التقوية. ونتيجة ذلك لا تتغلّف ألياف البورون تماماً بالراتنج. يُضاف إلى ذلك أن وجود المُذيب في المادة المقوّية يُسهم كثيراً في رفع تكلفة المنتَج النهائي من ناحيتين: (**1**) تجعل لزوجة الشريط الأولي التقوية وغيرها من خصائص التداول توضيع المذيب عملاً شاقاً يحتاج إلى كثير من الجهد، و(**2**) تجب إزالة المذيب واسترجاعه قبل عملية التصليد النهائية للبولي إيميد.

أما السيرورة الجافة الحالية فهي مصمّمة للتمكين من صنع شريط أولي التقوية (**1**) يحتوي على قليل، أو على لا شيء، من المذيب، و(**2**) له الأبعاد ومساحة الألياف السطحية ونسبة الراتنج المرغوب فيها، و(**3**) جميع ألياف مطلية تماماً بالراتنج، ومن ضمنها جميع ألياف البورون التي يجب أن تُوزَّع توزيعاً متجانساً. يجب أن يتّصف الشريط المقوّى بهذه الخواص كي يكون قابلاً للاستخدام في صنع مواد مركَّبة عالية الجودة بالتوضيع المؤتمت للشريط. أما إلغاء المذيب وأتمتة توضيع الشريط، فيُخفِّضان تكلفة التصنيع الكلية.

في هذه السيرورة، تُشكَّل طبقة من ألياف البورون المتوازية

وتوضع بين طبقتين من خيوط الألياف الكربونية المتوازية المطلية بمسحوق راتنج البولي إيميد. ثم تسخَّن الطبقات وتُكبس معاً لتكوين شريط من مادة مركَّبة. ووفقاً للمبيّن في الشكل 12 ـ 1، تُسحب ألياف البورون وخيوط ألياف الكربون المطلية بمسحوق راتنج البولي إيميد من البكرات عبر أمشاط تشكِّل الطبقات المختلفة من مجموعات الألياف بفواصل جانبية متوافقة مع الكثافات السطحية المرغوب فيها لألياف الكربون والبورون. وتُسحب الطبقات الثلاث عبر فرن ويُحافَظ على توازيها حتى تصل موضعاً تنزلق عنده كل طبقة من خيوط ألياف الكربون المطلية عبر مجموعة من قضبان التشريب والتوزيع. وتُضبط درجة حرارة مناطق الفرن بحيث توفّر حرارة كافية لصهر البولي إيميد قبل الوصول إلى القضبان. وتُسخَّن القضبان لتحفِّز انسياب الراتنج إضافة إلى تسهيل فرد الخيوط في أثناء انزلاقها فوق وتحت القضبان.

وبعد عبور القضبان، تُخرَج الطبقات من الفرن وتُكبس معاً بين أسطوانتَي قالب تشكيل. وتُضبط سرعة سحب الشريط ومكوّناته من الألياف بواسطة بكرَتَي جر بعد خروجه من قالب التشكيل. وتُختار السرعة بحيث تكون مدة التسخين كافية لانسياب الصُهارة المطلوب. بعدئذٍ يُلفُّ الشريط على بكرة شحن[1].




**الشكل 12 ـ 1: تُشكَّل طبقة من ألياف البورون بين طبقتين من خيوط ألياف الكربون المطلية بالراتنج. تفصل بين الألياف في كل طبقة مسافة في الاتجاه المعامد للصفحة. تُسخَّن الطبقات وتُكبس معاً لتكوين شريط من مادة مركَّبة[1].**

## المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية

كانت وصلة فوهة الضغط التي استُخدمت في المحرّك F110 العنفي الغازي، الذي صنعته شركة جنرال إلكتريك للطائرة F16، أول مكوِّن يُصنع من مادة مركَّبة ذات حاضنة من التيتانيوم.

يرتبط أداء الطائرات الحديثة مباشرة بنسبة دفع المحرّكات إلى أوزانها، وبالوزن الكلي لهيكل الطائرة ونظمها الجزئية ووقودها. والمواد المركَّبة ذات الحاضنة التيتانيومية هي مواد متقدمة من التيتانيوم المقوّى بفتائل أو جُسيْمات منفصلة من كربيد السليكون SiC. والقطع المصنوعة من تلك المواد أقوى وأخف كثيراً، وأشد مقاومة للإجهاد الناجم عن التسخين الزائد، من تلك المصنوعة من التيتانيوم العادي وخلائطه الفائقة. وهي تؤدّي إلى أداء أفضل أيضاً (من حيث المدى والحمل المفيد وكفاءة الوقود).

إن هذه التقانة هي مفتاح تحسين نظم الدفع في الجيل القادم من الطائرات المدنية والعسكرية. فالمتوقع منها أن تؤدّي إلى مزايا هائلة من حيث التكلفة والأداء والديمومة حين استخدام المكوِّنات المصنوعة منها في محرّكات طائرات النقل والطائرات المقاتلة. ومن التطبيقات الممكنة الأخرى لها هياكل الطائرات والتجهيزات الطبية وتجهيزات المعالجة الكيميائية.

إن تقانة صنع مكوِّنات من مواد الحاضنة التيتانيومية للاستخدامات المدنية والعسكرية ليست جديدة. لكن المؤسف هو أن هذه المواد كانت حتى الآن باهظة التكاليف بسبب عدم وجود قاعدة إنتاجية تمكِّن من الإنتاج المتكرر والمقبول التكلفة لمكوِّنات عالية الجودة. لذا شُكِّلت مجموعة من القوى الجوية والصناعية في الولايات المتحدة مهمتها إنضاج صناعة مواد الحاضنة التيتانيومية ونشرها في محرّكات العنفات الغازية على شكل شفرات وأطر مراوح

ومفعِّلات ومؤشّرات لاتجاه الريح وعلب ومجار وأعمدة وبطائن.

وإحدى الخطوات المهمة في ذلك الاتجاه كانت تخفيض تكلفة تصنيع وصلة فوهة الضغط بأكثر من 66 في المئة. صحيحٌ أن القطع المعدنية المنافسة الأخرى بقيت أرخص، إلا أن إجراءات تخفيض التكلفة المستمرة والتحسينات في سيرورة التصنيع سوف تجعل القطع المصنوعة من مواد الحاضنة التيتانيومية المركَّبة أشدّ إغراء من الناحية الاقتصادية لطيف واسع من التطبيقات المدنية والعسكرية. ويمكن لنشر وصلة فوهة الضغط خلال الـ 8 ـ 10 سنوات القادمة أن يعني صنع أكثر من 000 20 قطعة.



**الشكل 12 ـ 2: تحتوي مقاتلة سلاح الجو الأميركي النفاثة F16 على مادة مركَّبة ذات حاضنة معدنية من الألمنيوم المقوى بجُسيْمات كربيد السليكون، وذلك في زعنفة البطن وأغطية أبواب فتحات تعبئة الوقود. يُشير السهم إلى الزعنفة البطنية المصنوعة من مادة مركَّبة ألمنيومية[3].**

لكن استخدام الألمنيوم في المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية قُبِل بسهولة أكبر من قبول التيتانيوم. لقد استُخدمت المواد المركَّبة ذات الحاضنة الألمنيومية المقوّاة بجُسيْمات كربيد السليكون

في الطائرة F-16 لدى القوى الجوية الأميركية. وكان أحد تلك التطبيقات الزعانف البطنية في الطائرة التي وفرت استقراراً جانبياً في أثناء مناورات الهجوم بزاوية كبيرة (انظر الشكل 12 ـ 2). فقد حلّت صفيحة من المادة ذات الحاضنة المعدنية طراز A 6092/SiC/17.5p محل قشور الألمنيوم في بنية خلية النحل في الزعنفة، بسبب الجساءة النوعية ومقاومة الحتّ الكبيرتين اللتين تتصف بهما مركَّبات الحاضنة المعدنية، وهذا ما زاد من عمرها في الخدمة زيادة كبيرة. واستُخدمت المادة نفسها في أغطية أبواب منافذ الوقود في الطائرة F-16. كانت أغطية الألمنيوم غير المقوّى تتصدّع نتيجة الحمل الزائد، وهذا ما استوجب إجراء الاستبدال الذي كان ناجحاً بسبب الجساءة النوعية التي تتصف بها المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية.

وورد أيضاً أنه قد استُعيض عن أنبوب البوليمر المقوّى بألياف الكربون بأنبوب مبثوق من الألمنيوم المقوّى بجُسيْمات كربيد السليكون، وذلك في الدعامات الأرضية في طائرة الإيرباص. وكان الدافع إلى ذلك المقاومة الجيدة للتلف والتكلفة المنخفضة[1].

ويُصنع كُمُّ الجزء الدوّار من الحوّامة الأوروبية (Eurocopter) من خليطة الألمنيوم 2009 المقوّاة بجُسيْمات كربيد السليكون والتي تتصف بتحمُّل للإجهاد وجساءة جيدين. إن الاستعاضة عن التيتانيوم بالألمنيوم في المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية يخفّض كلاً من الوزن وتكلفة الإنتاج.

وفي صناعة السيارات، تتضمّن الخواص التي يهتم بها المهندس الجساءة النوعية، ومقاومة الاهتراء، ومقاومة دورات التعب الكثيرة. صحيحٌ أن تخفيض الوزن مهم أيضاً في تطبيقات السيارات، إلا أن الحاجة إلى تحسين الأداء، مع تكاليف أقل كثيراً مما هو مقبول في تطبيقات الفضاء والطيران، تُحرِّض على الالتفات إلى مواد

وسيرورات منخفضة التكلفة. لقد أُدخلت المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية بنجاح في الأماكن التي تُحقِّق فيها الخواص والتكلفة حاجة محدّدة:

- **المحرّك (Engine)**: إن استبدال الفولاذ وحديد الصبّ في مكوِّنات المحرّكات يعتمد على الجساءة النوعية الجيدة، وعلى مقاومة الاهتراء، وفي بعض الحالات على مقاومة دورات التعب الكثيرة، وهذه خواص توفّرها المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية. من التطبيقات المميزة للمواد المركَّبة ذات الحاضنة الألمنيومية مكابس محرّكات الديزل التي تصنعها شركة تويوتا. تتميز هذه المكابس بتقوية انتقائية لخليطة الألمنيوم بألياف مفرومة في منطقة الأخدود الحلقي تحقِّق مقاومة أكبر للاهتراء والتعب الحراري. وقد وُضعت تلك المكابس في الإنتاج الكمي في اليابان.

- والمكوِّن الآخر ذو التقوية الانتقائية هو **محرّك هوندا** Prelude 2.3-1. هنا جرى تشريب صُهارة الألمنيوم بمقوٍّ هجين من ألياف الكربون والـ $Al_2O_3$ لتشكيل بطائن لأسطوانات المحرّك في أثناء عملية الصبّ بالعصر المتوسط الضغط لجسم المحرّك.

- **نظام الكوابح (Brake System)**: توفّر المواد المركَّبة ذات الحاضنة الألمنيومية مجموعة مفيدة من الخواص لتطبيقات نظم الكبح حين استخدامها بديلاً لحديد الصبّ. إن مقاومة الاهتراء الكبيرة والناقلية الحرارية الشديدة التي تتصف بهما مواد الحاضنة الألمنيومية تمكِّنان من استخدامها في أقراص وأسطوانات المكابح مع تخفيض في الوزن يصل حتى 50 ـ 60 في المئة. ونظراً إلى أن تخفيض الوزن يحصل في الدواليب، فإنه يقلل قوى العطالة ويُحقِّق مزايا أخرى أيضاً.

- **محور نقل الحركة (Driveshaft)**: توفّر المواد المركَّبة ذات

الحاضنة الألمنيومية لمحاور نقل الحركة زيادة في الجساءة النوعية. إن محاور نقل الحركة الحالية، سواء كانت من الفولاذ أو الألمنيوم، مقيّدة بالسرعة القصوى التي يصبح عندها المحور غير مستقر ديناميكياً. لذا صُنعت محاور لنقل الحركة من مواد الـ Al 6061/ $Al_2O_3$ وذلك بالصبّ مع التحريك الذي تلاه البثق على شكل أنبوب.

**وفي القطاع العام، ثمة منتجات تجارية وصناعية:**

• **الحُجُب النووية (Nuclear Shieding)**: يُعتبر الألمنيوم المقوّى بالـ $B_4C$ واعداً في تطبيقات التحجيب النووي لأن النظير B10 الموجود في الـ $B_4C$ يمتص طبيعياً الإشعاعات النيوترونية. لذا يُنظر في استخدام هذا النوع من المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية في حاويات الخزن التي سوف تحتوي على قضبان الوقود المنضّب بعد انتهاء استخدامها في المفاعلات النووية.

• **القطع الدقيقة (Precision Parts)**: ورد أن المواد المركَّبة ذات الحاضنة الألمنيومية تُستخدم في التطبيقات الصناعية التي تحتاج إلى مادة خفيفة ودقة عالية. وأكثر تحديداً، فقد حلت إبرة مصنوعة من مادة مركبة ذات حاضنة ألمنيومية طولها 6 أمتار محل إبرة فولاذية في آلة لنسج السجاد[3].

• **خطوط نقل القدرة الكهربائية (Electrical Conductors)**: ثمة تطبيق مبتكَر ومتخصِّص لاستخدام الألمنيوم المقوّى بالألياف في خطوط نقل القدرة الكهربائية الهوائية. بتشريب مقوٍّ من الألياف المستمرة Nextel 610 بالألمنيوم يمكن للسلك الناتج أن يحل محل الأسلاك العادية المقوّاة بالفولاذ. إن جودة هذا المنتج من حيث نقله للكهرباء تساوي 1.5 ـ 3 أضعاف من جودة أسلاك الألمنيوم المقوّاة بالفولاذ. يُضاف إلى ذلك أن نسبة مقاومة الناقل للشدّ إلى وزنه

تمكِّن من الإبقاء على البنية التحتية القائمة الخاصة بنقل الكهرباء، ومنها الأبراج، مع إمكان زيادة المسافة بينها. إن هذا المفهوم المتقدم في قيد الاختبارات الحقلية حالياً.

● وأحد المجالات المهمة لاستخدام المواد المركَّبة ذات الحاضنة الألمنيومية هو **تعليب الإلكترونيات والتبديد الحراري**. إن الخاصية الرئيسة لهذه المواد التي تستحوذ على الاهتمام في هذا المجال هي إمكان تفصيل عامل التمدّد الحراري للمادة وفق الرغبة مع الاحتفاظ بناقلية حرارية جيدة، وفي بعض الحالات يُحتفظ بالناقلية الكهربائية، إضافة إلى خفة الوزن. وتمثل هذه المكوّنات عادةً قيمة مضافة عالية.

● **ألمنيوم ـ سليكون ـ كربون (AlSiC)**: تُسمي الصناعة المادة المفتاحية ذات الأهمية التجارية بالـ «AlSiC». وبرغم أنها لا تمثّل أي صيغة محدّدة، فإنها تغطي عموماً مواد مركَّبة ذات حاضنة ألمنيومية مقوّاة بجُسيْمات كربيد السليكون التي تقع نسبتها الحجمية بين 20 وأكثر من 70 في المئة، بناءً على احتياجات التطبيق.

● **التعليب في تطبيقات الأمواج الميكرويّة (Microwave Packaging)**: أحد التطبيقات المبكرة لمواد الحاضنة الألمنيومية المركَّبة، التي تساوي نسبة المقوي الحجمية فيها 40 في المئة، هو استخدامها بدلاً من الخليطة الثقيلة Ni-CO-Fe في تعليب بعض تطبيقات الأمواج الميكرويّة. والدوافع الرئيسة لهذا الاستخدام هي خفة وزن تلك القطعة الذي انخفض بمقدار 65 في المئة، إضافة إلى الناقلية الحرارية الجيدة مقارنةً بتلك التي للمادة الأصلية.

● **أغطية المعالجات الصغرية (Microprocesor Lids)**: الدافع إلى استخدام الـ AlSiC في أغطية المعالجات الصغرية، خاصة في

علب الرقاقات التي تلحم مباشرة على الدارة، هو الحاجة إلى بديل للنحاس خفيف الوزن ومنخفض التكلفة. يمكن تفصيل مُعَامل التمدّد الحراري للمادة المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية بحيث يتوافق مع العلبة المجاورة، وذلك بالتحكُّم بنسبة المقوي الحجمية.

• **تطبيقات أخرى (Other Application)**: تُصنع الطبقة الناقلة في لوحات الدارات المطبوعة من مواد الـ AlSiC أيضاً بدلاً من النحاس أو الألمنيوم الشائعين. فإلى جانب خاصية توافق مُعَامل التمدّد الحراري، تقلل الجساءة النوعية الكبيرة من التعب الناجم عن الدورات الحرارية والاهتزازات. وثمة تطبيق آخر تُعتبر فيه خواص هذه المادة الحرارية مهمة هو حوامل الدارات الهجينة في مضخّمات القدرة في محطات الشبكة الهاتفية الخلوية.

وتُستغل الناقلية الحرارية الممتازة وخفة الوزن، اللتان تتصف بهما المواد المتوافقة من حيث مُعَامل التمدّد الحراري أيضاً في صفائح قواعد وحدات التغذّية الكهربائية التي تُصنع من المواد المركبة ذات الحاضنة المعدنية القائمة على الـ AlSiC أو على الألمنيوم ـ الغرافيت.

## قولبة الراتنج بالنقل والحقن/ قولبة الراتنج بالنقل والحقن مع الشي/ قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعَدة التخلية/ قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة المطّاط

يبحث المهندسون عن طرائق معالجة بديلة يمكنها تخفيض التكاليف مع الحفاظ على الأداء الجيد للمكوّنات المصلَّدة بالمِحَمِّ (Autoclave). وخلال السنوات القليلة الماضية، تطورت تقانات قولبة المواد المركَّبة السائلة (Liquid Composite Molding) (LCM) إلى درجة تجعل منها ذاك البديل. تتميز قولبة المواد المركَّبة السائلة

بحقن راتنج سائل ضمن خامة تشكيل ليفية جافة، ومن أنواع القولبة تلك قولبة الراتنج بالنقل والحقن (Resin Transfer Molding) (RTM) وقولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) (VARTM).

في قولبة الراتنج بالنقل والحقن المعهودة، توضع خامة التشكيل ضمن قالب مغلق ذي شكل ملائم، ويُضغط فيها الراتنج تحت ضغط من رتبة 0.69 ـ 1.38 ميغا باسكال. يوجد في سيرورة القولبة المنخفضة الضغط هذه مزيج راتنجي ومحفّز يُحقنان في خامة التشكيل التي في القالب المغلق. وعندما يتصلّد الراتنج، تُخرج القطعة المقولبة النهائية من القالب.

يمكن استخدام طيف واسع من الراتنجات في هذه السيرورة، منها البولي إستر والفينيل إستر والإيبوكسي والفينوليك وميثاكريلات الميثيل، مع أصبغة وحشوات مثل هدرات الألمنيوم الثلاثية وكربونات الكالسيوم إذا كانت ثمة حاجة إليها. ويمكن لخامة الليف أن تكون من الزجاج أو الكربون أو الأراميد أو من مزيجاً منها.

إلا أن سيرورات القولبة بنقل وحقن الراتنج المبكرة افتقرت إلى دقة قالب التشكيل الضرورية للمكوّنات الجوية والفضائية، من حيث سماحيات الأبعاد والخواص الميكانيكية. وكانت نسبة الألياف الحجمية أخفض كثيراً من النسبة 60 ـ 65 في المئة المعتادة في المقويات التمهيدية. وأدت مشكلات التوقّع بجبهات التدفّق وبالعيوب التي تدخل في خامة التشكيل حين إغلاق القوالب المتوافقة غالباً إلى فراغات كثيرة وبقع جافة.

يُضاف إلى ذلك أنه كان ثمة تنافس دائم بين سيرورتي القولبة

المغلقة والقولبة المفتوحة للهيمنة على سوق المواد المركَّبة مع ظهور المقاييس الجديدة لوكالة حماية البيئة الأميركية وقوانين الحد من التلوّث، وثمة أيضاً توجه متنام للانتقال إلى السيرورات المغلقة. فصناعة القوارب البحرية، وصناعة حجرات عنفات الرياح، وصناعات أخرى كانت يوماً ما تحت هيمنة سيرورات القولبة المفتوحة، تتجه الآن إلى سيرورات القولبة المغلقة، ومنها القولبة بنقل وحقن الراتنج والقولبة بنقل وحقن الراتنج بمساعدة التخلية. وقد صنَّفت دراسة السوق الأخيرة (*Global Composites Market 2003-2008*) صناعة المواد المركَّبة العالمية، وكثيراً من القطاعات الصناعية كالصناعة البحرية وصناعة السيارات والإنشاءات، بدلالة سيرورات القولبة المفتوحة والمغلقة المختلفة، وأعطت صورة واضحة عن أحجام تلك السيرورات في قطاعات السوق المختلفة[4].

إلا أن التحسينات في كل من المواد والسيرورات جعلت أخيراً من قولبة الراتنج بالنقل والحقن خياراً عملياً للصناعات الجوية والفضائية، حيث تحتاج التقانات الجديدة عادة إلى نحو 10 ـ 15 سنة لقبولها. لكن الفتح التقاني الذي حصل في قولبة الراتنج بالنقل والحقن بدأ حينما اختارتها الشركة لوكهيد مارتين لصنع كثير من المكوِّنات الإنشائية للطائرة F/A-22 Raptor. تمثّل المواد المركَّبة نحو 27 في المئة من وزن الطائرة F/A-22 الإنشائي (24 في المئة مواد تتصلَّد حرارياً و3 في المئة مواد تتلدَّن حرارياً). واستُخدمت قولبة نقل وحقن الراتنج لصنع أكثر من 400 قطعة مختلفة من راتنجات الإيبوكسي والبيزمال إيميد (Bismaleimide). وربما كانت دعامات الأجنحة ذات الشكل الموجي الجيبي أول تطبيق إنشائي للمواد المركَّبة المصنوعة بقولبة نقل وحقن الراتنج في الطائرات. وفي ما يخص الذيل الشاقولي في طائرة أخرى لشركة لوكهيد مارتن،

خفضت سيرورة قولبة نقل وحقن الراتنج عدد القطع من 13 قطعة إلى قطعة واحدة، ملغية بذلك 1000 مثبت تقريباً، وخفضت تكلفة التصنيع بأكثر من 60 في المئة[5].

لكن نظراً إلى أن قولبة الراتنج بالنقل والحقن أشدّ تعقيداً من التصليد بالمِحمَّات، فإن من الصعب تطوير منهجية عامة لقبول المنتَج النهائي. في حالة التقوية التمهيدية، يَمزج مصنِّع المواد الراتنج ويُشرِّب به الشريط أو القماش في ظروف مسيطر عليها تماماً. وحين إقرار مواصفات المادة، ليس على مستخدمها النهائي سوى التحقُّق من أنها مطابقة عملياً لما تعطيه سيرورة تصنيعها. لكن في حالة القولبة بنقل وحقن الراتنج، تكون جميع مكوِّنات مزيج الراتنج ونسبها متغيّرة. وعلى وجه الخصوص، يتحدَّد محتوى الراتنج النهائي بضرورة الحفاظ على جبهة تدفّق جيدة.

وتحد أيضاً التكلفة العالية لتحضير أدوات قولبة الراتنج بالنقل والحقن من اعتمادها، حيث يمكن لتكلفة مجموعة من أدوات الإنتاج أن تكون من رتبة الـ 500000 دولار. صحيحٌ أن هذه التكلفة تكافئ تكلفة أدوات المِحمَّات، إلا أنه يمكن تدبير أمور برامج المحمَّات بمجموعة أدوات واحدة لكل من التطوير والإنتاج. أما في حالة القولبة بنقل وحقن الراتنج، فإن جبهة تدفّق الراتنج (ولذا جودة القطعة) تعتمد كثيراً على الشكل الهندسي لأدوات القولبة. وغالباً ما تكون ثمة حاجة إلى بناء مجموعة أو أكثر من النماذج الأولية للأدوات، وإلى تطوير واختبار السيرورة قبل بناء أدوات الإنتاج. ورغم أنّ النماذج الأولية للأدوات أقل تكلفة من أدوات الإنتاج، إلا أنها ليست رخيصة إلى درجة اعتبارها مهملة.

يمكن لمحاكاة سيرورة القولبة أن تتوقّع بجبهات التدفق، موفّرةً للمهندسين إمكانية الاختبار الفعلي لتصاميم القالب المختلفة من دون

بناء عتاد مكلف. على سبيل المثال، يمكن نمذجة تدفّق الراتنج وتحديد مواقع الحقن الفضلى وتسلسله للوصول إلى ملء تام للقالب من دون بقع جافة.

لو طلبتَ إلى 100 شخص تعريف القولبة بنقل وحقن الراتنج، لأتاك 100 جواب مختلف. فلدى كل مصنِّع نموذجه الخاص به من القولبة بنقل وحقن الراتنج، وفي كثير من الحالات، تكون الفوارق كبيرة إلى حد يكفي لاعتبار كل جواب يخص سيرورة مختلفة. حتى إن الاختلافات تصبح أشدّ حينما يأتي الأمر إلى قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية، التي يمكن أن تتضمّن قيام مصنِّع لهيكل قارب باستخدام السيرورة (Seeman Composite Resin Infusion Molding Process) (SCRIMP)، وقيام مصنِّع آخر لمكوِّنات فضائية جوية باستخدام قوالب كلها من الفولاذ مع التخلية فقط. على سبيل المثال، لدى شركة V System Composites[5] ثلاثة أنواع من القولبة: قولبة الراتنج بالنقل والحقن العادية، وقولبة الراتنج بالنقل والحقن العالية الأداء بمساعدة التخلية (HyPer-VARTM (High Performance VARTM)، وقولبة الراتنج بالنقل والحقن العالية الأداء HyPerRTM، التي فُصِّلت كل منها لغرض مختلف.

قولبة الراتنج بالنقل والحقن العالية الأداء بمساعدة التخلية هي سيرورة لحقن الراتنج موجهة إلى الصناعة الجوية والفضائية. يُستخدم في معظم سيرورات قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية وسط تدفّق للحصول على تغلّغُل جيد للراتنج. وهذا يعمل جيداً في حالة البُنى البسيطة نسبياً المشابهة لهياكل القوارب، إلا أنه لا يستطيع التعامل مع الأشكال الممتلئة بالتعقيدات كتلك الشائعة في المكوِّنات الجوية والفضائية، حيث تكون ثمة حاجة إلى توضيعات متعدّدة أو إلى إزالة طبقات. إن قولبة الراتنج بالنقل والحقن العالية الأداء بمساعدة التخلية هي نظام حقن وحيد المدخل، لأن نظام إدخال

الراتنج موجود ضمن القالب، وهذا ما ينفي الحاجة إلى وسط للحقن، ويُخفِّض كثيراً من المُستهلَكات واليد العاملة، مؤدّياً إلى مزيد من انخفاض التكاليف. ويوفِّر التحكّم الانتقائي بالنفوذية عبر القطعة تحكُّما ممتازاً بنسبة الليف الحجمية. إن هذه السيرورة جاهزة للإنتاج، وقد جرى إثبات جدارتها في سطح البرج الأمامي في الحوّامة CH-47، وفي صحن عاكس للأمواج الميكرويّة الواردة من أعماق الفضاء في المجال Ka لمصلحة مختبرات الدفع النفاث لدى وكالة الفضاء الأميركية. وتنظر شركة إيرباص حالياً في استخدام تلك السيرورة في الإنتاج أيضاً.

والطريقة الثالثة لدى شركة VSC هي قولبة نقل وحقن الراتنج العالية الأداء التي تصفها الشركة بأنها تجمع أفضل ما في السيرورتين الأخريين. تُبنى قوالب سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج العالية الأداء باستخدام سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج العالية الأداء بمساعدة التخلية، ويمكن أن تتضمّن بعض الأشكال التفصيلية المعدنية حيث يلزم. وتُبنى أيضاً تفاصيل توزيع الراتنج ضمن قالب سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج العالية الأداء. وتمكِّن هذه السيرورة من صنع قطع تتصف بالجودة العالية التي تعطيها القولبة بنقل وحقن الراتنج العادية، لكن بسعر تلك التي تعطيها قولبة الراتنج بالنقل والحقن العالية الأداء بمساعدة التخلية.

وطُوِّرت سيرورة مبتكرة جديدة من خلال مساعي الصناعة والحكومة تخفيض تكاليف التصنيع والتجميع. تسمّى هذه السيرورة قولبة الراتنج بالنقل والحقن مع الشَيّ (Co-Curing Resin Transfer Molding) (CoRTM) (شَيّ قشرة غير مشوية على بنية جزئية مقولبة بحقن الراتنج). طوَّرت شركة Northrop Grumman السيرورة، وهي تُستخدم لصنع بُنى كبيرة متكاملة خفيفة دقيقة متكررة[6].

استُخدمت منصة مستقرة شاقولياً من الطائرة F-35 لاستعراض هذه التقانة. وقد بيَّنت النتائج أن استخدامها في صنع تلك القطعة خفَّض التكاليف بنحو 14000 دولار من خلال تقليص الأدوات وأعداد القطع والمثبّتات وما يرافقها من مساعدات التثبيت والحشوات السائلة ومعالجة الخطوط الناتئة الناجمة عن القولبة السطحية في المْركَبات الجوية.

تتكوّن هياكل الطائرات العادية من وحدات مجمَّعة من قطع متفرقة تُجمَّع معاً إفرادياً. وتُملأ الفجوات بين السطوح المتزاوجة بمواد حشو للحصول على شكل أنيق، ثم تُجمَّع الوحدات ميكانيكياً في أمكنتها. وهذا يؤدّي إلى مُدَد تصنيع طويلة جداً إضافة إلى تكاليف عالية.

أما الآن، فقد ثبت أن قولبة الراتنج بالنقل والحقن مع الشَيّ هي بديل واعد قابل للتطبيق عملياً لصنع بُنى مركَّبة تكاليفها مقبولة. تضم هذه السيرورة سيرورتين مُجديتَي التكلفة: توضيع ألياف (التوضيع المؤتمت لشلل ألياف شديدة مقاومة الشدّ مع الراتنج في القالب) البُنى القشرية المستخدمة حالياً في الطائرات F-35 وF-18 وV-22 وF/A-22 وغيرها، وقولبة الراتنج بالنقل والحقن (حقن راتنج شديد المقاومة في قالب يحتوي على ألياف شديدة المقاومة لها الشكل المطلوب) لصنع البُنى الجزئية المستخدمة حالياً في الطائرة F/A-22 وغيرها من الطائرات[7].

عوضاً عن تثبيت القشرة على البنية الجزئية، تمكِّن القولبة مع الشَيّ من تصميم القشرة والبنية وصنعهما كقطعة واحدة، لاغيةً الحاجة إلى تثبيتهما معاً في ما بعد. وهذا يعطي قطعاً ذات عدد أصغري من الأجزاء والمثبّتات ويخفِّض تكلفة التجميع.

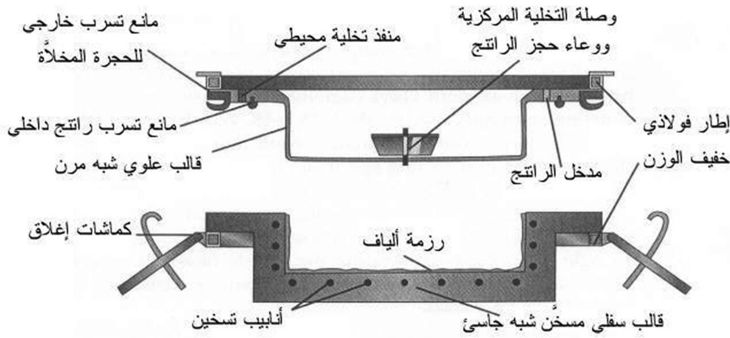
لقد أدّى استخدام هذه السيرورة في صنع ذيل الطائرة F-35 إلى انخفاض بمقدار 52 في المئة في عدد القطع، و38 في المئة في عدد الأدوات، و7 في المئة في الوزن، و17 في المئة في التكلفة الكلية، مقارنةً بحالة بناء الطائرة المعتادة.

تُشير عبارة قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية إلى عدد من السيرورات المختلفة التي تمثّل أسرع تقانات القولبة الجديدة نمواً. ويكمن الفارق الأساسي بين سيرورات حقن الراتنج بمساعدة التخلية وسيرورات حقن الراتنج الأخرى في أن الراتنج يُسحب إلى داخل خامة التشكيل بواسطة التخلية، بدلاً من ضغطه بواسطة مضخّة. ولا تتطلب قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية ضغطاً عالياً أو حرارة مرتفعة. لذا تُستخدم في هذه السيرورة أدوات منخفضة التكلفة تجعل من الممكن إنتاج قطع كبيرة معقّدة رخيصة في دفعة واحدة.

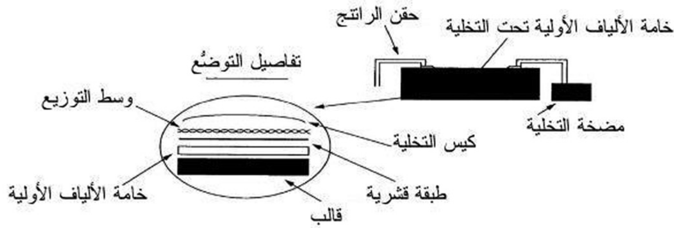
إن أفضل وصف لقولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية هو أنها سيرورة متمّمة للقولبة بنقل وحقن الراتنج. إن تكلفة قالب الحقن بمساعدة التخلية تساوي من حيث المبدأ نصف تكلفة قالب سيرورة الحقن العادية المكافئ، إلا أن إنتاجية الحقن بمساعدة التخلية تساوي، في أحسن الأحوال، نصف تلك التي في قولبة الراتنج بالنقل والحقن العادية. ومع ذلك، فإن هذه السيرورة توفّر للعاملين في القولبة مدخلاً مغرياً إلى الإنتاج بالقوالب المغلقة.

لكن في القولبة بمساعدة التخلية، لا يمكن زيادة معدّلات انسياب الراتنج إلى ما فوق مستوى أمثلي بُغية ملء القالب بسرعة أكبر، لأن بنية القالب الموصى بها، وتثبيته بالضغط الجوي يحدّان من الضغط الكلي داخل القالب ليكون أقل من 0.5 بار.

وعلى غرار أي تقنية قولبة مغلقة للمواد المركَّبة، فإن قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة التخلية لا تشذ عن القاعدة في حاجتها إلى قوالب دقيقة عالية الجودة بغية تحقيق عمر طويل للقالب وإنتاج متناسق لقطع جيدة (انظر الشكل 12 ـ 3).




**الشكل 12 ـ 3: سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج بمساعدة التخلية[8].**




**الشكل 12 ـ 4: مخطط سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج بمساعدة التخلية مع تفاصيل التوضيع[8].**

في سيرورة القولبة بنقل وحقن الراتنج بمساعدة التخلية، توضع المقويات الليفية في قالب وحيد الجانب، ويوضع غطاء (صلب أو مرن) فوق القالب لتوفير كتامة للتخلية. ويدخل الراتنج عادة القالب

من خلال منافذ مختارة المواضع. ويُسحب الراتنج إلى داخل المقوي بالتخلية بواسطة سلسلة من القنوات المبنية داخلياً تسهل تبليل الألياف. ويمكن لنسبة الليف في القطعة النهائية أن تصل حتى 70 في المئة. من التطبيقات الحالية لهذه التقنية التطبيقات البحرية والنقل البري وقطع البُنى التحتية.

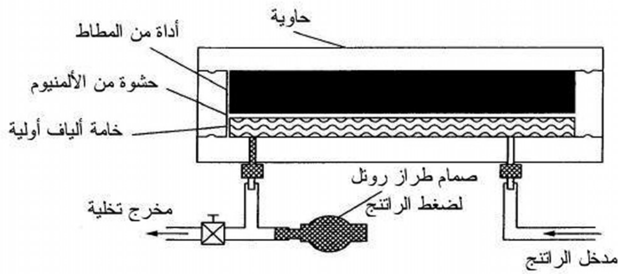
وجرى مؤخراً تطوير سيرورة قولبة بنقل وحقن الراتنج بمساعدة التخلية هي قولبة الراتنج بالنقل والحقن التسلسلية المؤتمتة المتعدّدة المنافذ (Sequential Multi-Port Automated Resin Transfer Molding) (SMART-Molding) بغية أتمتة سيرورة التشريب كلياً. تتضمّن الطريقة سيرورات تسلسلية لحقن الراتنج، ومفعِّلات للتحكُّم في التدفق، ومُحِسَّات لكشف سلوك التدفّق في أثناء حقن الراتنج، وتحكُّم مستمر لاستمثال فتح وإغلاق المفعِّلات. وقد تمّ عرض النظام بنجاح في تجارب على السيرورة المخبرية[8] (انظر الشكل 12 ـ 4).

هذه أول مرة تُؤتمت فيها سيرورة نقل وحقن الراتنج كلياً. تُفتح بوابات الحقن تسلسلياً حينما تكتشف مُحِسَّات التدفّق المبنية في القالب جبهة التدفّق عند سطح القالب عند بوابة معيّنة. إن هذه الطريقة تلقائية كلياً، وهي لا تعتمد على تغيّرات نفوذية الراتنج أو التغيّرات في خصائص خامة التشكيل أو عوامل المعالجة الأخرى. يُضاف إلى ذلك أنها لا تتطلب التطوير العالي التكلفة القائم على التجربة والخطأ الموجود في الطريقة التسلسلية العادية، ولذا لا تحتاج إلى الخبرة الهندسية الضرورية عادةً في أثناء تشريب الراتنج. إلا أنه يجب تحديد عدد المنافذ ومواقع المُحِسَّات[8].

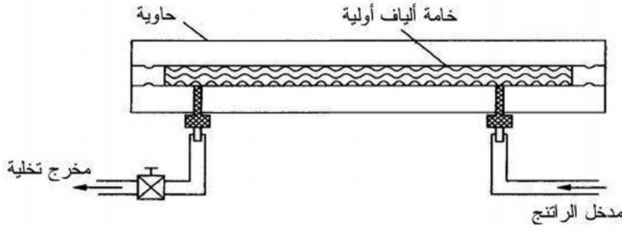
ويُستخدم في سيرورة قولبة الراتنج بالنقل والحقن بمساعدة المطّاط (Rubber Assisted Resin Transfer Molding) (RARTM)

قالب مغلق ومطّاط محجوز وصمّام لتحرير الضغط. وهذا يحقِّق:

- إغلاقاً سهلاً للقالب.
- انسياباً محسَّناً للراتنج وتبليلاً جيداً للألياف.
- نسبة حجمية كبيرة من الألياف، ومحتوىً منخفضاً من الفراغات.




**الشكل 12 ـ 5: سيرورة القولبة بانتقال وحقن الراتنج بمساعدة المطاط.**




**الشكل 12 ـ 6: سيرورة القولبة بانتقال وحقن الراتنج العادية.**

يبيّن الشكل 12 ـ 5 هذه السيرورة بغية مقارنتها بسيرورة نقل وحقن الراتنج العادية (الشكل 12 ـ 6) التي هي سيرورة مغلقة القالب منخفضة الضغط.

تُستخدم طريقة حقن متتال في هذه السيرورة مع منافذ ومخارج حقن متعدّدة. توضع القطعة عمودياً في أثناء الحقن، ويُحقن الراتنج في أخفض جزء من البنية الفراغية للقطعة ويُخرج من أعلى موضع. وعندما يصل الراتنج إلى المنفذ، تُزال التخلية ويُحقن الراتنج، وتكرر الإجرائية مع تقدم الراتنج نحو الأعلى في القطعة.

## سيرورات التسريب: تسريب غشاء الراتنج/ طريقة شركة DIAB

صحيحٌ أن ثمة أنواعاً كثيرة من سيرورة التسريب (Infusion Process)، ومنها ما هو خاص وما هو عام، إلا أن مبدأها الأساسي يبقى نفسه. توضع مواد جافة (مقويات ونواة) في قالب وتغطى بكيس تخلية ككيس المكنسة. ثم تُجرى التخلية، ويُدخل الراتنج في القالب، فيسحبه الخلاء عبر القطعة حتى التشبّع. ويُحافَظ على الخلاء حتى تتصلّد القطعة.

تعطي هذه السيرورة عادة قطعاً عالية الجودة، أي وزناً منخفضاً بسبب نسبة الألياف الكبيرة. وهي سيرورة تحافظ على المواصفات نفسها في الإنتاج المتكرر، إضافة إلى كونها سهلة التحكُّم بها باستخدام نظام إدارة الجودة. لذا فهي لا تعتمد على مهارات العاملين الفردية، وتعطي قطعاً متماثلة ومتجانسة الجودة. ويمكنها تحسين بيئة العمل تحسينا جذرياً، وإذا حصل ذلك باستخدام آلة مزج وتوزيع، أمكن إنقاص الانبعاثات بأكثر من 95 في المئة مقارنةً بطرائق القالب المفتوح.

لكن أحد العوامل المهمة فيها هو تحقيق تدفّق جيد للراتنج في أثناء القولبة. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام أنواع مختلفة من وسائط التوزيع. من حيث المبدأ، يمكن لتدفُّق الراتنج أن يحصل في ثلاثة مواقع مختلفة في أثناء توضيع المادة:

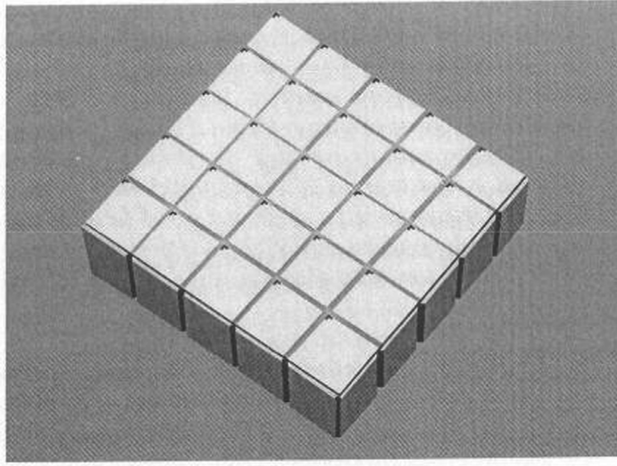
• **فوق الصفيحة الإنشائية (طبقة الألياف) (Above the Structural Laminate)**: باستخدام وسط توزيع منفصل ذي نفاذية منخفضة فوق طبقة الألياف، يتوزع الراتنج على سطحها. تعطي هذه الطريقة قطعة ذات نسبة كبيرة من الألياف، لكنها تؤدّي أيضاً إلى نسبة كبيرة من النفايات. توضع فوق طبقة الألياف عادة طبقة قابلة للتقشير على شكل غشاء لتحرير القالب، ثم يوضع وسط التوزيع قبل وضع كيس التخلية في الأعلى. وجميع هذه المواد مستهلَك عادة ويُرمى بها بعيداً بعد كل عملية قولبة. ونظراً إلى أنها ليست رخيصة من حيث الشراء والتوضيع والإزالة والتخلّص منها، فإنها ترفع تكلفة المنتَج كثيراً. تُعرف هذه الطريقة بأسماء تجارية مختلفة.

• **ضمن طبقة الألياف (In the Structural Laminate)**: يتوزع الراتنج على السطح باستخدام حصيرة توزيع ذات نفاذية منخفضة ضمن طبقة الألياف. تعطي هذه الطريقة نسبة ألياف أقل، ولذا وزناً أكبر من ذاك الذي في حالة التسريب السطحي، لكنها لا تولِّد مقداراً كبيراً من النفايات. وهي تمكِّن أيضاً من تكوين غشاء هلامي على كلا السطحين إذا استُخدم قالب علوي خفيف. يوضع وسط التوزيع ضمن طبقة الألياف قبل وضع كيس التخلية في الأعلى. ثمة أنواع مختلفة متوافرة في الأسواق من مادة التوزيع هذه.

• **تحت طبقة الألياف (below the Structural Laminate)**: يوزَّع الراتنج على سطح النواة باستخدام نواة ذات أخاديد. تعطي هذه الطريقة نسبة ألياف كبيرة، ولذا وزناً أصغر. وهي لا تولِّد مقداراً كبيراً من النفايات. وتمكِّن أيضاً من تكوين غشاء هلامي على كلا السطحين إذا استُخدم قالب علوي خفيف.

إن سيرورة تسريب غشاء الراتنج هي سيرورة يُشرَّب فيها غشاء راتنجي في خامة التشكيل بصهره وتسريبه فيها. وسيرورة التسريب

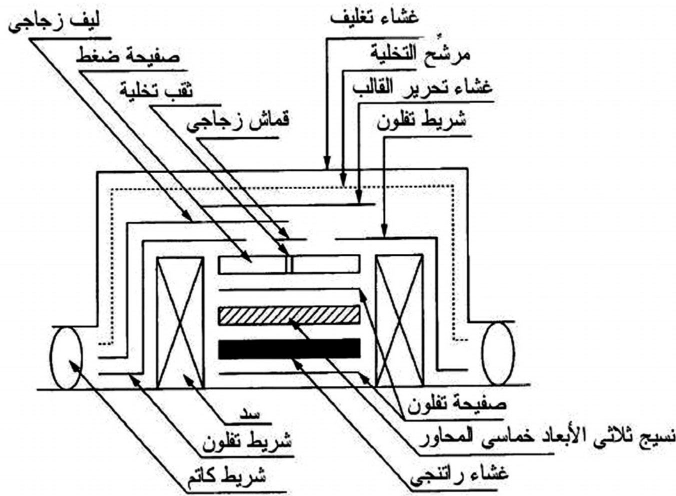
التي تستخدم نواة ذات أخاديد هي طريقة مبتكرة جديدة سريعة ورخيصة من طرائق القولبة المغلقة لصنع مكوّنات إنشائية ذات قشرة من مركَّبات الألياف[9]. تُستخدم في الطريقة الأخيرة نواة على سطحها أخاديد ناعمة مستمثلة الأشكال لتسهيل توزيع الراتنج (انظر الشكل 12 ـ 7).



**الشكل 12 ـ 7: مثال لأنماط أخدودية في سطح النواة[9].**

يبيّن الشكل 12 ـ 8 إحدى الطرائق التي استُخدمت في التغليف بتسريب غشاء الراتنج. وُضع غشاء راتنج تحت قماش ثلاثي الأبعاد خماسي المحاور لإزالة الهواء تماماً من القماش. وكان غشاء الراتنج قد حُضِّر سلفاً بصهر البيزمال إيميد عند 100 مْ مئوية تقريباً وقولبته على شكل لوحة مستوية. يتصف البيزمال إيميد في حالة الصُهارة بلزوجة منخفضة جداً تساوي 100 سنتيبواز أو أقل، وهو سهل التشريب جداً. ونظراً إلى إمكان تسربه من خلال خلوصات السدَّيْن، يُحكم سد الخلوصات بشريط من التفلون (Teflon). وضُبط مقدار

الراتنج بحيث يمكن لنسبة الألياف الحجمية في المركَّب المنتَج أن تصبح 50 في المئة. وأُجريت عملية التصليد عند درجة حرارة تساوي 191 مْ وضغط يساوي 0.62 ميغا باسكال مدة 6 ساعات[10].




**الشكل 12 ـ 8: تشكيلة تغليف بسيرورة تسريب غشاء الراتنج[10].**

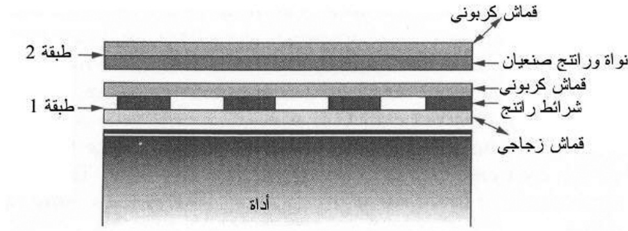
وطوَّرت الشركة DIAB[11] طريقة جديدة سريعة ورخيصة للقولبة المغلقة لإنتاج مكوّنات مغلفة بقشرة من المواد المركَّبة. تُستخدم في هذه الطريقة أشكال أخدودية ناعمة مُستمْثلة على سطح النواة لتسهيل توزيع الراتنج. وهذا يؤدّي إلى النتائج الآتية:

- نواة ذات أخاديد ← تدفّق أسرع من دون الحاجة إلى وسط توزيع إضافي.
- تدفّق أسرع ← لوحات أكبر ممكنة
- لوحات أكبر ← مواد إضافية أقل ونفايات أصغرية المقدار.
- مواد إضافية أقل ← توضيع مواد أسرع ومنتَج أقل تكلفة.

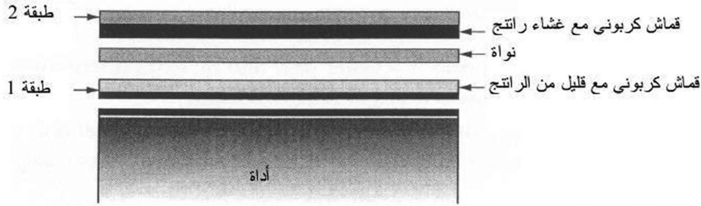
تتصف طريقة شركة DIAB بكونها سريعة جداً وبإمكان صنع بُنى كبيرة بواسطتها دفعة واحدة. وهي لا تحتاج إلى مواد إضافية مستهلَكة كمواد توزيع الراتنج وأغشية تحرير القالب وطبقات التقشير، وهي ودودة للبيئة ورخيصة التكاليف. ويمكن تحقيق تخفيضات جيدة في التكلفة أيضاً مقارنةً بالطرائق العادية إذا كُيِّفت القوالب وتجهيزات الإنتاج على نحو ملائم. ومن أمثلة استخدامها الناجح عملياً هياكل القوارب، وحجرات عنفات الرياح، والأكواخ، والحاويات، والخزّانات[12].

وتُعدُّ اللوحات المصنوعة من ألياف الكربون تقانة راسخة في سيارات السباق والسيارات الرياضية الفخمة. تمكِّن هذه المادة من الإنتاج الكمي المحدود لمكوِّنات خفيفة ومتينة. وقد جرى تطوير مواد جديدة لتوفير بدائل منخفضة التكلفة لعمليات التشريب المعتادة وطريقة للإنتاج بكميات كبيرة.

وقد أجرى فروست (Frost) وسولانكي (Solanki) وميلّز[13] (Mills) دراسة لتقييم ثلاث مواد جديدة هي: Sprint CBS من شركة SP Systems، وZpreg من Advanced Composites Group (انظر الشكل 12 ـ 9)، وCarboform من شركة Cytec (انظر الشكل 12 ـ 10). وكان التقييم بغرض استخدام تلك المواد في النموذج الاستعراضي ذي الوزن الخفيف جداً لسيارة الكربون المستقرة هوائياً. فقد دُرست مدة الإنتاج وإنهاءات السطوح ومقاومة الصدمة وقورنِت بتقانة التشريب القَبْلي. وقد بيَّنت النتائج أن طريقة تسريب غشاء الراتنج الجديدة كانت بديلاً جيداً للمواد القَبْلية التشريب، وأن استخدامها يؤدّي إلى خفض كبير في تكاليف الإنتاج.




**الشكل 12 ـ 9: مخطط السيرورة** Zpreg[13].




**الشكل 12 ـ 10: مخطط يوضح بنية المادة** carboform[13].

## المواد المركَّبة ذات الحاضنة السيراميكية

المواد المركَّبة ذات الحاضنة السيراميكية هي مواد تُضمِّن طوراً مقوِّياً في طَور حاضن في أثناء التصنيع. وتُصنع هذه المواد باستخدام تقنيات من قبيل التلبيد أو الكبس الساخن. وتتكوَّن خامة التشكيل المقوِّية أحياناً من ألياف سيراميكية طويلة ذات مقاومة شدّ عالية. وتُسرَّب حاضنة سيراميكية في خامة التشكيل بطرائق من قبل توضيع البخار كيميائياً، وتحويل المحلول إلى هلام، أو تسريب البوليمر.

تخضع مواد الحاضنة السيراميكية المركَّبة إلى التطوير لدى العديد من المختبرات الحكومية الأميركية والمرافق الصناعية لتوفير

بديل للسيراميكات الكتلية الجسيمة ذي متانة أكبر يتكسَّر بالنمط غير الكارثي، لا الهشوشي. إن أفضل المواد المركَّبة الحالية التي تتصف بأنماط الانهيار غير الهش هي المواد المركَّبة ذات سيراميكات الألياف المستمرة (Continuous Fiber Ceramic Composite).

إلا أن معظم المواد الأولية لسيراميكات الألياف المستمرة المتقدمة ليست حالياً في مرحلة الإنتاج الواسع النطاق. لذا كانت النماذج الأولية للمكوِّنات المصنوعة منها باهظة الثمن على المدى القصير. لكن مع تطور هذه التقانة، يجري باستمرار تحديث بنيتها الأساسية بنماذج جديدة محسَّنة غالية عموماً. لذا ثمة حاجة إلى البحث والتطوير لاستقصاء مسألة التكلفة على نحو أفضل وتخفيض تكاليف المواد الأولية. تبلغ تكلفة الألياف غير الأُكسيدية آلاف الدولارات للكيلو غرام الواحد. أما سعر الكيلو غرام من الألياف الأُكسيدية الموجودة في الأسواق منذ سنين عديدة فربما يزيد على الألف دولار بسبب محدودية الإنتاج الكمي.

إن استمثال طبقة الطَور البيني (الملتقى) بين ألياف التقوية والحاضنة السيراميكية مهم لإنتاج سيراميكات الألياف المستمرة العملية تجارياً. حالياً، تُوضَّع طبقة الملتقى بتقنيات مخبرية تمثّل مرحلة مكلفة في سيرورة التصنيع. إلا أن التحدّي التقاني هو تحقيق الاستقرار الحراري المطلوب عند درجات الحرارة 1200 ـ 1500 مْ. فالاستقرار السيئ عند درجات الحرارة العالية هو أهم عيب في سيراميكات الألياف المستمرة الحالية.

لقد تحقَّقت تحسينات مهمة في السنوات الخمس السابقة. فقد أُثبت أن بعض سيراميكات الألياف المستمرة تتحمل بيئات قاسية كتلك التي عملت فيها عنفات غاز صناعية مدة 2500 ساعة في مجال درجات الحرارة 1100 ـ 1200 مْ. وزادت طلاءات الحماية البيئية التي

طُبِّقت على السطوح العمر حتى 5000 ساعة، مع توقعات بزيادته حتى 10 000 ساعة.

أما التطبيقات الصناعية المستهدفة بهذه السيراميكات فتتطلب مدة حياة تصل حتى 20 000 ساعة أو أكثر، وتتطلب تحمُّل درجات حرارة أعلى في المجال 1200 ـ 1500 مْ. والمواد المركَّبة غير الأُكسيدية، من قبيل تلك التي تحتوي على الـ SiC، ليست مستقرة حرارياً في جو الهواء الغني ببخار الماء عند درجات الحرارة العالية.

إلا أن بعض التقدم قد تحقَّق. فقد أدت طلاءات الحماية البيئية الأُكسيدية إلى تحسين إضافي في استقرار سيراميكات الألياف المستمرة وإلى زيادة عمرها. وبناءً على أبحاث أُجريت في الأعوام الثلاثة السابقة، تبيَّن أن ثمة حاجة الآن إلى طلاءات حماية بيئية لتحقيق عمر مقبول للمكوِّنات المصنوعة من سيراميكات الألياف المستمرة SiC-SiC في بيئة العنفات الغازية عند درجات حرارة أعلى من 1100 مْ.

لكن على المدى القريب، يبقى السعر العالي للمكوِّنات المصنوعة من مواد سيراميكات الألياف المستمرة العقبة الرئيسة أمام نمو تطبيقاتها التجارية. إن البحث في تخفيض تكاليف المواد الأولية سوف يزيد من الإنتاج الكمي الذي بدوره سوف يخفِّض كثيراً أيضاً تكلفة المنتَج.

والتوجُّهات في إلكترونيات أنصاف النواقل تمثّل تحدياً، ليس لمصنِّعي الرقاقات فقط، بل لمصنِّعي لوحات الدارات المطبوعة أيضاً. تتكوَّن لوحات الدارات المطبوعة، المستخدَمة في أكثر من 95 في المئة من المنتجات الإلكترونية اليوم، من طبقات من الزجاج المقوَّى بالألياف. وهذه اللوحات ليست عالية الكلفة ويمكن معالجتها بأحجام كبيرة (تتجاوز 60 سم)، إلا أنها لا تستطيع حمل الدارات

المتكاملة القادمة العالية السرعة والفائقة الكثافة. من ناحية أخرى، توفّر اللوحات السيراميكية الاستقرار الحراري والميكانيكي المطلوبين، إلا أنه لا يمكن معالجتها بأحجام كبيرة، وهذا ما يجعل السيراميك مكلف جداً في معظم التطبيقات. لذا موَّلت الحكومة الأميركية برنامج تطوير للوحات دارات مطبوعة مكوَّنة من مواد مركَّبة سيراميكية موثوقة منخفضة التكلفة مشتقة من البوليمرات تستطيع حمل النظم الإلكترونية الميكرويّة المستقبلية. سوف تمتلك مادة اللوحة الخواص الميكانيكية والحرارية والكهربائية المطلوبة، ومنها الجساءة الشديدة والامتصاص المنخفض للرطوبة، ومقاومة الاعوجاج، ومُعَامل التمدّد الحراري المنخفض، واستقرار الأبعاد الجيد، وجميع هذه الخواص ضروري لحمل توصيلات عالية الكثافة، في أربع أو ثماني طبقات، إضافةً إلى وظائف متعدّدة متضَمَّنة فيها.

وبالفعل، فقد طُوِّر بوليمر منخفض التكلفة لتكوين سيراميك من كربيد السليكون يمكن تفصيل خواصه الكيميائية لتحقيق متطلبات الأداء ودرجات الحرارة الصارمة لنظم الإلكترونيات المتقدمة. سوف يُستخدم هذا البوليمر في تقانة المعالجة الخاصة بتصنيع بُنى رقيقة من مواد مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية مقوّاة بألياف ميكرويّة، وهذا ما يمكِّن من التصنيع المنخفض التكلفة للوحات ناعمة مستوية للنظم الإلكترونية المتقدمة. بتصميم مادة للّوحات متوافقة من حيث التمدُّد مع السليكون، يمكن إلغاء سيرورة أساسية مكلفة. لذا سوف تُستخدم في برنامج التطوير هذا خبرات تطوير نظم إلكترونية سابقة بغية تطوير سيرورة ونماذج حاسوبية للتوقّع بسلوك اللوحة وخواصها، وبالتوصيلات الدقيقة في اللوحة والوحدات المجمَّعة على اللوحات المنهاة، وإجراء اختبارات لتأكيد أن هذه التقانة الجديدة تلبي

متطلبات تطبيقات التعليب الإلكتروني المتقدمة. وسوف يدعم هذا العمل تقانة لوحات الدارات المطبوعة التي سوف تؤدّي دوراً أساسياً في ابتكارات الجيل القادم من تقانة النظام في علبة System-on-a Package التي سوف تحقِّق تحسيناً كبيراً يقدَّر بعشرة أضعاف من حيث الحجم والتكلفة والوثوقية والأداء. إن النظام في علبة يمكن أن يحقِّق مزايا المكاملة في مستوى النظام على نحو أسرع وأرخص مما يمكن أن يُحقِّقه النظام في رقاقة الكثير المشاكل.

## المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية

طُوِّرت مواد مركَّبة متناحية من حواضن مصنوعة من خلائط الألمنيوم مع جُسيْمات $Al_2O_3$ بوصفها بدائل، رخيصة وخفيفة الوزن وذات مقاومة نوعية للشدّ عالية، للخلائط الفائقة القائمة على النيكل والحديد. تتصف هذه المواد بوزن نوعي يساوي 3.45 غ/سم$^3$ وبمقاومة شدّ نوعية تساوي نحو 200 ميغا باسكال/(غ/سم$^3$). أما مقاومتها للشدّ عند درجة حرارة الغرفة فتساوي 689 ميغا باسكال، وتساوي جساءتها 206 جيغا باسكال. وعند 260 مْ، احتفظت هذه المواد بـ 80 في المئة من مقاومتها للشدّ، وبـ 95 في المئة من جساءتها. وهي تتصف أيضاً بتحمُّل جيد للتعب، إضافة إلى خواص تزليق جيدة. ويمكن إنتاجها بمقاسات وأشكال نهائية (أو شبه نهائية) لصنع العلب والمكابس والصمّامات والمجاري المستخدمة في الآلات العنفية، ولصنع مكوِّنات إنشائية لنظم شديدة التنوع كمحرّكات الديزل، ونظم مكابح السيارات، وتوليد الطاقة، والمناجم، وتجهيزات التنقيب عن النفط. وجرى في عمل منفصل عرض استخدام المواد المركَّبة ذات الحاضنة المعدنية تلك في سيرورة صب الألمنيوم الثقالي (Gravity Casting).

يمكن صنع قطعة من هذا النوع من المواد المركَّبة بسيرورة الصبّ بالتسريب المضغوط. تبدأ السيرورة بوضع قالب يحتوي على خامة أولية، مكوَّنة من جُسيْمات $Al_2O_3$ منفصلة، لها حجم وشكل نهائي (أو شبه نهائي) في بوتقة في فرن مخلّى من الهواء. وتوضع شحنة من الخليطة في البوتقة مع خامة التشكيل، ويُخلَّى الفرن، وتُشغَّل مسخِّناته لتسخين الخليطة إلى درجة حرارة تزيد على درجة انصهارها. ثم يُملأ الفرن بغاز الأرغون تحت ضغط يساوي نحو 6.2 ميغا باسكال لدفع الخليطة المصهورة إلى التغلغل عبر خامة التشكيل. وحينما يكتمل التسريب، يُترك كامل محتوى البوتقة ليبرد في مكانه، وتُخرج بعدئذٍ القطعة النهائية من القالب.

تُزيد الحشوات المكوَّنة من جُسيْمات سيراميكية منفصلة مقاومة المعدن النوعية للشدّ ومقاومته للاحتراق. ويقول الباحثون أن تضمين الجُسيْمات السيراميكية في الأدوات المعدنية وغيرها من الأشياء المعدنية المستخدمة في جو غني بالأُكسجين (كما في المركَبات الفضائية وحجرات الأُكسجين العالية الضغط) يمكن أن تقلِّص خطر الحريق وما ينجم عنه من أذى للأشخاص. من ناحية أخرى، تعمل الأشياء المعدنية في مثل تلك البيئات مصادر اشتعال مؤديّة إلى مخاطر الحريق. لكن ليست جميع المعادن متكافئة في خطورتها. فبعضها أشدّ مقاومة للاحتراق من غيرها. وقد كان غرض الباحثين هو تحديد مواد الحاضنة المعدنية المقاومة للاحتراق، والعالية المقاومة النوعية، ذات الجُسيْمات السيراميكية التي يمكن أن تُستخدم في البيئات الغنية بالأُكسجين.

لقد درس الباحثون عدة معادن. تُبدي خلائط النيكل والكوبالت مقاومة شديدة للاحتراق، وهي كثيفة (تقع كثافاتها بين 7 و9 غ/سم$^3$). إلا أن استخدام هذه الخلائط في الرحلات الفضائية أو

التطبيقات الصناعية، حيث يستحوذ تخفيض الوزن على الاهتمام الرئيس، لن تكون زيادة الوزن الناجمة عن زيادة مقاومة الاحتراق مقبولة. أما الألمنيوم والتيتانيوم، فهما أقل كثافة بحيث يمكنهما تحقيق معظم متطلبات الوزن، إلا أنهما أشدّ عرضة للاحتراق في الأجواء الغنية بالأُكسجين. ففي جو الأُكسجين الصافي، يشتعل الألمنيوم عند ضغط مطلق يساوي نحو 170 كيلو باسكال، ويشتعل التيتانيوم عند ضغط مطلق يقل عن نحو 14 كيلو باسكال.

ودرس الباحثون أيضاً سيراميكات يعرفون أنها لا تعمل مصادر إشعال. فخلافاً للمعادن، تقاوم السيراميكات الاحتراق بطبيعتها. إلا أن متانتها إزاء الكسر منخفضة. ونظراً إلى أن السيراميك الشائع يفتقر إلى المطاوعة والديمومة والمقاومة التي تتصف بها المعادن، فإنه نادراً ما تُستخدم في الفضاء الخارجي وفي البيئات الصناعية. لكن الباحثين اكتشفوا مواد مركَّبة ذات حاضنة معدنية مقوّاة بجُسيْمات سيراميكية يمكن أن توفّر أفضل ما في هاتين الفئتين من المواد من خواص: مقاومة السيراميك للاحتراق ومقاومة المعدن للشد. وقد بيَّنوا أنه حين تضمين جُسيْمات السيراميك في معادن ذات مقاومة احتراق منخفضة، مثل الألمنيوم والتيتانيوم، فإنها تزيد من تلك المقاومة بامتصاصها حرارة الاحتراق. وفي حالة المعادن ذات مقاومة الاحتراق العالية، كالنيكل والنحاس، فقد تبيَّن أن جُسيْمات السيراميك تزيد المقاومة النوعية للشدّ مع الحفاظ على مقاومة الاحتراق.

وتشير البيانات الأولية الناتجة عن اختبارات الاحتراق إلى أن خليطة الألمنيوم A339 المحشوَّة بـ 20 في المئة من كربيد السليكون تقاوم الاحتراق عند ضغوط مطلقة تصل إلى نحو 8.3 ميغا باسكال، وهذا ضغط يساوي 48 ضعفاً من ضغط عتبة اشتعال الألمنيوم غير

المحشو. وتشير البيانات إلى أنه من بين المواد المركَّبة التي اختُبرت حتى الآن، تتصف هذه الخليطة بأكبر مقاومة للاحتراق وأكبر مقاومة نوعية للشد، وإلى أنها أفضل مرشح للاستخدام في الأجواء الغنية بالأُكسجين.

## ألياف وشعيرات وجُسيْمات متقدمة

### الألياف السيبورامية

سوف تفرض نظم الاحتراق في الجيل القادم، من تطبيقات توليد الطاقة والطيران والسيارات، متطلبات قاسية على المواد والمكوِّنات، لأن الحاجة إلى كفاءة وقود أعلى وانبعاثات أقل تدفع درجات حرارة الاحتراق نحو الأعلى. وقد أُرغم الصناعيون فعلاً على استخدام خلائط فائقة وألياف سيراميكية غالية في تطبيقات الاحتراق العالية الحرارة.

السيبوراميك (Siboramic) (سيراميك السليكون والبورون SiBN3) هو ليف سيراميكي يتصف بخواص حرارية ميكانيكية ممتازة، ولا يحتاج إلى المعالجة بالطلاءات المتكررة المكلفة التي تحتاج إليها ألياف السيراميك العادية. وهذا الليف السيراميكي المنخفض الكثافة لا يحتاج إلى شَيّ بالإشعاع الإلكتروني، ويبقى قابلاً للاستخدام عند درجات حرارة تصل حتى 1500 مْ في جو من الأُكسجين.

تُستخدم هذه الألياف لصنع مواد مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية لها تطبيقات رئيسة في المجال الجوي الفضائي وفي توليد الطاقة، حيث يُتوقَّع إحراز تخفيضات كبيرة في تكاليف التشغيل من خلال انخفاض الوزن والكفاءة الحرارية العالية. وهي مقاومة للتآكل مع مواد

كالنحاس والسليكون في حالتها السائلة. ومن تطبيقاتها مكوِّنات محرّكات السيارات والصمّامات والمكابس وأقراص المكابح، إضافة إلى نُظم حرق النفايات وشفرات العنفات وبطائن محرّكات الطائرات.

### شعيرات التيتانيوم ـ بورون

تُعدُّ شُعيرات التيتانيوم ـ بورون TiB Whiskers المقوِّية مُغرية بسبب عدم وجود طَور وسيط بين الـ Ti والـ TiB، وعدم وجود حد أدنى لنسبة البورون، إضافة إلى درجة الحرارة المنخفضة نسبياً اللازمة لمعالجة هذه المادة المركَّبة، لأنه يمكن معالجة الـ Ti-TiB عند درجات حرارة تتراوح بين 900 و1300 مْ.

وإحدى المزايا الرئيسة الأخرى لتلك المادة المركبة هي أن الـ TiB يشكّل شعيرات نقية طويلة أحادية البلّورة ضمن الحاضنة التيتانيومية. هذا يعني أنه بمقدار ضئيل من المقوِّي، يمكن تحقيق زيادة كبيرة في مُعَامل يونغ ومقاومة الشدّ في المادة، بناءً على نظريات زيادة المقاومة والجساءة الناجمة عن الشُعَيرات. من ناحية أخرى، لا تتصف المركَّبات TiC، TiN، $Ti_3Si_5$، $TiB_2$ بهذه المزية، لأنها لا توجد في حالة توازن ترموديناميكي كالشُعَيرات في الحاضنة التيتانيومية.

ويمكن للشعيرات TiB أن تتكوَّن في التيتانيوم بتفاعل الحالة الصلبة. صحيحٌ أن طاقة تكوين الـ $TiB_2$ أشدّ سلبية، إلا أنه يمكن للـ Ti و الـ $TiB_2$ أن يتفاعلا لتكوين الـ TiB بسبب السلبية الصغيرة في الطاقة الحرة لهذا التفاعل. هذا يعني أن شعيرات الـ TiB يمكن أن تتكوَّن في التيتانيوم بتفاعل التيتانيوم مع جُزَيئات الـ $TiB_2$ ما دام المقدار الوسطي من البورون صغيراً. يُعطى هذا التفاعل بـ:



$$Ti + TiB_2 \rightarrow 2TiB$$

إن المقدار الوسطي من البورون اللازم لتكوين الـ TiB صغير

جداً، لأن المركَّب يتطلب ذرّة بورون واحدة لكل ذرّة تيتانيوم، في حين أن الـ $TiB_2$ يتطلب ذرّتَي بورون مقابل كل ذرّة تيتانيوم.

**أما طرائق صنع الشُعَيرات فهي**(•):

- التطريق (Wrought).
- الخلط الميكانيكي (MA) + الكبس الحار المتساوي الضغط (HIP).
- تعدين المسحوق (PM) + الكبس الحار المتساوي الضغط (HIP).
- التذرير بوجود غاز الأرغون (GA) + البثق بالكبس الحار المتساوي الضغط (HIP/Extrusion).
- الصهر في الخلاء بالقوس الكهربائية (VAR) + التجعيد الحار (Hot Swaging).
- الخلط الميكانيكي (MA) + الكبس البارد المتساوي الضغط (Hot Swaging) (CIP) + التلبيد (Sintering) + التجعيد الحار (Hot Swaging).
- تعدين المسحوق (PM).

وبسبب التفاعل المذكور آنفاً، يمكن استخدام تقنيات التصنيع هذه في الحالة الصلبة القائمة على تعدين المسحوق والتلبيد لصنع مواد الـ Ti-TiB المركَّبة. إن كلا من المساحيق التجارية، والمساحيق المخلوطة سلفاً والمذرَّرة غازياً، إضافة إلى المساحيق المخلوطة ميكانيكياً، ملائمة للاستخدام. فبعد الخلط الأولي بالكبس البارد المتساوي الضغط، تُلبَّد المواد عادة تلبيداً حراً أو بالكبس الحار المتساوي الضغط لتحقيق التكاثف والتفاعل بين التيتانيوم ومسحوق الـ $TiB_2$ لتكوين شُعَيرات الـ TiB داخل الحاضنة المستمرة.

ونظراً إلى جساءة شعيرات الـ TiB وقساوتها الشديدتين، وإلى

---

(•) **MA**: Mechanical Alloying, **PM**: Powder Metallurgy Processing, GA: Argon Gas Atomization, **VAR**: Vaccum Arc Melting, **CIP:** Cold Isostatic Pressing, **HIP**: Hot Isostatic Pressing.

كثافتها المنخفضة، فإن مواد الـ Ti-TiB المركَّبة يمكن أن تكون مرشحة جيدة للتطبيقات التي تتطلب وزناً خفيفاً ومقاومة شدّ كبيرة. وبإدخال تحسينات على التركيب والمعالجة، وبالتحكُّم بالبنية الميكرويّة، فإنه من المنطقي أن نتوقَّع قيمة تساوي نحو 180 جيغا باسكال لمعامل المرونة، ونحو 1200 ميغا باسكال لمقاومة الشد، ونحو 2 ـ 3 في المئة من المطاوعة باستخدام نحو 30 في المئة من شعيرات TiB في البنية الميكرويّة.

لذا فإن إحدى الإمكانات القريبة الأجل هي الاستعاضة عن الفولاذ ذي مقاومة الشدّ الكبيرة بهذه المواد المركَّبة في بعض التطبيقات. فهذا يمكن أن يخفِّض الوزن بنحو 45 في المئة، مع زيادات كبيرة في مقاومة الزحف والأكسدة والاهتراء والتآكل. وهذا استشراف مستقبلي واعد في ضوء هذه المرحلة المبكرة من التطوير.

من بعض التطبيقات الجديرة بالاهتمام لمواد الـ Ti-TiB المركَّبة رؤوس عصي الغولف وصمّامات العادم في عربات الخدمة الرياضية التي تصنعها الشركة تويوتا. وتبيِّن بعض الأبحاث المنشورة أن احتفاظ هذه المواد بالمقاومة عند درجات الحرارة العالية ممتاز أيضاً، وهذا ما يشير إلى إمكان استخدامها في تطبيقات درجات الحرارة المرتفعة. صحيحٌ أن تكلفة صنعها قد تكون في البداية مرتفعة، بسبب طبيعة معالجة المسحوق التعدينية، إلا أن تكلفة القطعة في الإنتاج التجاري الواسع النطاق سوف ينخفض حتماً انخفاضاً كبيراً.

## المواد المركَّبة الحيوية

ثمة برامج استقصاء وبحث تُجرى لتطوير مواد مركَّبة حيوية (Biocomposites) تقوم على سيراميك الهيدروكسي أباتايت (Hydroxyapatite) النشط حيوياً والإسمنت العظمي المعروف ببوليمر

ميثاكريلات الميثيل poly(methyl methacrylate) (PMMA)، والغرض منها هو تقوية التفاعل بين إسمنت العظام والنُسُج وتثبيتها. إلا أن المادة السيراميكية المركَّبة، التي تجمع ما بين الخواص المغرية للـ $Al_2O_3$ الصلب والزركونيا المتينة المثبّتة جزئياً بالإيتريوم، يمكن أن تحقِّق خواص قد تكون أفضل من تلك.

وثمة بحث آخر يُدرس فيه إمكان استخدام الألمنيوم المقوَّى بالزركونيا لاستبدال كامل الورك. إن هذه المادة المركَّبة الحيوية الجديدة، التي تتألف من نحو 75 في المئة من الـ $Al_2O_3$، توفِّر مقاومة ميكانيكية ومتانة إزاء الكسر مشابهة لتلك التي للزركونيا، إضافة إلى كونها قاسية كالـ $Al_2O_3$ تقريباً. وهي متوافقة حيوياً أيضاً، وقد أبدت في الاختبارات التي أُجريت على الحيوانات، وفي أنابيب الاختبار الزجاجية، أن هذا الثنائي يوفّر خواص انزلاق لجراحة استبدال الورك كلياً أفضل من تلك التي يوفِّرها الثنائي الشائع $Al_2O_3$ مع $Al_2O_3$.

ثمة إمكانات كبيرة للسيراميكات الحيوية في المستقبل. وقد بيَّنت الخبرات السابقة أن جميع التطبيقات الناجحة للسيراميكات الحيوية تقوم على عمل متعدّد التخصّصات يبدأ ببحث وتطوير بسيطين. ومع اكتسابنا لمزيد من الفهم للتصميم باستخدام السيراميك، فإن عدداً غير محدود من التطبيقات الجديدة سوف يظهر إلى الوجود.

وأحد التطبيقات الرئيسة لها هو استبدال الورك. لقد حرَّضت المخاوف من ترقُّق العظام بوساطة البولي إيثيلين تطوير تراكيب حاملة بديلة لاستبدال الورك كلياً. وفي السنوات العديدة الماضية، جرى تطوير منتَج جديد مبتكر: مادة مركَّبة ذات حاضنة سيراميكية يمكنها إلغاء الترقُّق الناجم عن البولي إيثيلين.

وقد تركّزت الجهود في استقصاء سلوك اهتراء السطوح السيراميكية المتمفصلة معاً، حيث جرى اختبار رؤوس وكؤوس مفاصل فخذية من المادة المركَّبة السيراميكية على مُحاكٍ للورك استغرق 4.2 مليون حركة مفصلية. وأُخضعت للاختبار في الوقت نفسه أزواج من المفاصل المصنوعة من الـ $Al_2O_3$ بغية المقارنة المباشرة، وفي الظروف نفسها، لمقاومة اهتراء المادة المركَّبة السيراميكية والـ $Al_2O_3$. وقورنت أيضاً مقاومة الحاضنة للاهتراء بتراكيب أخرى من مواد السطوح المتمفصلة في ظروف الاختبار نفسها.

تشير بيانات اختبارات الرؤوس والكؤوس الفخذية المصنوعة من المادة المركَّبة ذات الحاضنة السيراميكية إلى أن معدّلات الاهتراء كانت منخفضة جداً ولم تتجاوز 0.016 مم$^3$/ مليون حركة مفصلية. أي إن ثمة إمكانية لاستخدام تلك المادة لتصميم الورك من دون اللجوء إلى البولي إيثيلين ذي الوزن الجُزَيئي الكبير جداً، وهذا يعني القضاء على المرض الناجم عن البولي إيثيلين. وتشير معدّلات الاهتراء المنخفضة أيضاً إلى المستوى المنخفض من جُسيْمات السيراميك الناتجة، وهذا يؤدّي إلى مزيد من تقليص إمكانية التفاعلات الحيوية النشطة لهذه المادة. وأُجريت اختبارات أخرى لتحديد احتمال اهتراء المادة ذات الحاضنة السيراميكية تلك مع إبقاء تأثير إجراءات التصنيع في النتائج أصغرياً.

### كريستالوي (Crystaloy$^{TM}$)

حدَّد هذا العمل الأولي إمكان تحقيق انخفاض في الاهتراء مقداره 57 في المئة خلال عشر سنوات، و75 في المئة خلال عشرين سنة مقارنةً بذلك الذي للـ $Al_2O_3$. وفي أثناء اختبارات الحالة

المستقرة (Steady State Tests)، أبدت المادة المركَّبة الجديدة اهتراءً حجمياً يقل بـ 38 في المئة عن اهتراء الـ $Al_2O_3$، ويقل بـ 29 مرة عن اهتراء المحامل المعدنية، وبـ 3529 مرة عن محامل المعدن والبولي إيثيلين. ولوحظ أيضاً نمو بروتينات أقل مع المادة الجديدة، ولعل ذلك يعود إلى التسخين الاحتكاكي المنخفض المتحقِّق بسبب ناقلية المادة الحرارية التي تساوي 3 أضعاف تلك التي للـ $Al_2O_3$.

يُضاف إلى ذلك أن مقاومة المادة الجديدة للشدّ تساوي 1.5 ـ 1.8 ضعفاً، ومقاومتها للكسر تساوي 2.4 ضعفاً، من تلك التي للـ $Al_2O_3$. إن جميع تلك النتائج، مع قابلية المادة الجديدة للتصنيع بأشكال معقّدة، تشير إلى إمكانية أن يقضي هذا السيراميك على القيود والمخاوف المقترنة بكثير من السيراميكات المستخدمة حالياً في جراحة الورك التعويضية.

## السيرورات الليزرية

يقوم الباحثون لدى معهد شيبا للتقانة في اليابان[14] (Chiba Institute of Technology) بالتشكيل الليزري لصفائح معدنية رقيقة لتكوين بُنى ثلاثية الأبعاد، وذلك بقصها أولاً ثم جعلها تنحني بإضاءة أجزاء معيّنة منها بضوء ليزري أقل قدرة. تبقى الصفيحة مستوية بين لوحي زجاج في أثناء مسحها بالليزر، وتنحني بعد تحريرها. وقد تكون ثمة حاجة إلى مسح ليزري بعد التحرير لتحقيق مزيد من الانحناء فيها.

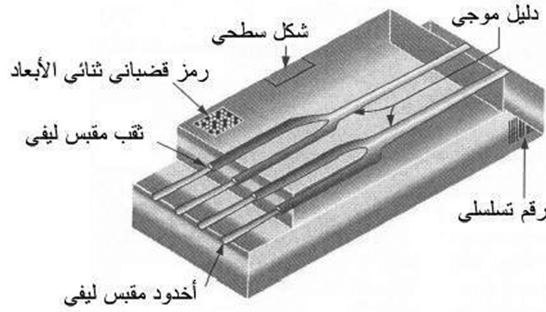
من أجل صفيحة فولاذ عديم الصدأ سماكتها تساوي 10 ميكرون، استُخدم ليزر Nd:YAG ذو حزمة قدرتها تساوي 0.3 واط، وقطرها يساوي 25 ميكرون، لمسح الصفيحة 5 مرات، وذلك

لتحقيق انحناء حاد (ثني). ومن أجل صفيحة سماكتها تساوي 20 ميكرون، كانت تلك القيم 0.8 واط، ميكرون، ومُسحت الصفيحة 10 مرات. إن المسح الواسع لمنطقة على الصفيحة تجعلها تلتف، وفي أثناء المسح، تنحني الصفائح المستوية دائماً باتجاه السطح الممسوح، أما في الصفائح المحنية سابقاً، فيكون الانحناء دائماً باتجاه السطح المنحني. يمكن بهذه التقنية قص وحني أشكال مثل الوشائع والحلزونات والمربعات المشوهة والمكعبات الميكرويّة. ويمكن حني النحاس والألمنيوم بواسطتها أيضاً، حتى إنه يمكن حني الزجاج بزاوية تصل حتى 12 درجة.

اعتمد التشكيل الدقيق للأجزاء المعدنية في الماضي على المهارة الشخصية، وعلى الأدوات المعقّدة، وكلاهما مُكلِف. من ناحية أخرى، يمكن استخدام حزم الليزر العالية الكثافة لتسخين وحني الصفائح المعدنية، إلا أن آليات سيرورة التشكيل الليزري ليست مفهومة تماما وكذلك قابلية التحكُّم الدقيق فيها. لذا ثمة مشروع مشترك تقوده الشركة جنرال إلكتريك[15] بغية تطوير تقانات لسيرورة ليزرية قابلة للتحكُّم فيها وقادرة على تحقيق المواصفات نفسها في الإنتاج المتكرر، وذلك بغرض تشكيل وإعادة تشكيل طيف واسع من القطع المعقّدة من صفائح وأنابيب معدنية تحقّق متطلبات ميكانيكية محدّدة. ويعتزم فريق البحث تطوير ومكاملة تقانات نمذجة وتعدين قابلة للتحكُّم فيها في نظام يمكن أن يتقبّل أشكالاً هندسية مختلفة للقطع المشغَّلة، وخواص متنوعة للمواد، وموسّطات متعدّدة للتحكُّم في النظام، إضافة إلى تعقيد المكوِّنات. وسوف يسعى الباحثون إلى نمذجة سيرورات التشكيل الليزري المستخدمة مع أنواع القطع المختلفة، وإلى فهم كيفية تأثير خواص المواد فيها وتأثرها بها، وإلى تطوير أدوات لتحسُّس انسياب السيرورة والتحكُّم بها تكيُّفياً.

إذا نجح المشروع، فإنه يمكِّن من تقليص الحاجة إلى أدوات تشكيل شديدة التخصُّص، ويوفِّر زيادة في مرونة التصميم والتصنيع المحدود المتكيِّف لمنتجات متناسقة عالية الجودة، مع قليل من النفايات أو من دون نفايات. وسوف يستفيد من هذه التقانة الذكية طيف واسع من التطبيقات، خاصة في صناعة السيارات والطائرات. وسوف تستفيد منها أيضاً صناعات بناء السفن والتجهيزات الثقيلة وبناء الجسور، وفنون النحت والعمارة. وبتخفيض هذه التقانة للمدة بين بدء التطوير والوصول إلى السوق بمقدار 50 في المئة، ولتكاليف إنتاج بعض القطع بما يصل حتى 80 في المئة، يمكن لصناعة تشكيل المعادن الأميركية أن تقتصد 320 مليار دولار بحلول عام 2010. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن صنع منتجات لا يمكن صنعها على نحو مُجدٍ اقتصادياً بالطرائق الشائعة.

تخدم النسائق الإلكتروبصرية كثيراً من التطبيقات القائمة والبازغة، ومنها الاتصالات وخزن البيانات ومُحِسَّات «المخبر في رقاقة» الحيوية المستخدمة في كشف مهددات الحرب الجرثومية أو في نظم التشخيص في المستوصفات. يمكن صنع كثير من هذه التجهيزات الآن على شكل وحدات زجاجية صلبة بتقانة التشغيل الليزري الميكروي الجديدة التي تمكِّن من التصنيع الليزري الشامل ذي الكفاءة العالية مع مزايا أداء معيّنة. تتضمّن هذه السيرورة خطوات عدة هي تشريح الطبقات الزجاجية، ووضع علاّمات فريدة عليها، وحفر أشكال من دون سطحية فيها كالأدلة الموجية الضوئية وشبكات براغ (Bragg). أما التشغيل الميكروي لأشكال خارجية، كالثقوب وأخاديد مقابس الليف الضوئي، فهو ضروري أيضاً كي يستطيع الضوء الدخول إلى النسيقة والخروج منها (انظر الشكل 12 ـ 11)[16].




**الشكل 12 ـ 11: يتضمن تصنيع تجهيزة إلكتروبصرية على شكل نسيقة زجاجية وحيدة الكتلة عدة خطوات. في هذا المثال، صُنع مفرِّع ليفي أولاً باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون لقص ركيزة زجاجية من صفيحة زجاجية كبيرة، ثم حُفر عليها رقم تسلسلي باستخدام ليزر حالة صلبة يولِّد نبضات أشعة فوق بنفسجية نانوية الطول. ثم شُغِّلت ثقوب قبس ليفية باستخدام ليزر ثاني أكسيد الكربون عالي النبضة (أو ليزر أشعة فوق بنفسجية طول موجته يساوي 266 نم). وأخيراً استُخدم ليزر تيتانيوم: ياقوت أزرق يُعطي نبضات أطوالها من رتبة الفمتو ثانية لحفر أدلة موجية وحيدة الطبقة (أو متعددة طبقات)[16].**

تُسمى سيرورة تقطيع الصفائح الزجاجية الكبيرة وفصلها لتكوين ركائز أصغر بالتفريد (singulation)، وكانت هذه العملية تُجرى سابقاً باستخدام طريقة الخدش والكسر (Scribe and Break Method). يُخدش الزجاج بشفرة من الألماس فينكسر، بالنقر الخفيف، على طول خط الخدش. أما في الصناعة، حيث ينتشر التفريد كما في تصنيع الشاشات المسطّحة، فتُستخدم الآن ليزرات ثاني أُكسيد الكربون التي تصل قدرتها حتى 250 ـ 500 واط لقص الزجاج بمعدل يصل حتى 300 مم/ثانية[16]. وخلافاً لطريقة الخدش والكسر الميكانيكية، لا يؤدّي القص الليزري إلى تصدّعات ميكرويّة يمكن أن تنتشر مع الوقت عبر الركيزة الزجاجية. يُضاف إلى ذلك أن القص الليزري يمكن أن يزيد الإنتاجية الكلية، بإلغائه لمعظم عمليات

الصقل والتنظيف في ما بعد القص الضرورية لتنعيم الحواف، وبإلغائه لغبار الزجاج الذي يتكوَّن في أثناء الخدش. يُظهر الجدول 12 ـ 1 مقارنةَ أُجريت في دراسات أخيرة لمعدّلات معالجة المواد بغية تحديد أفضل تركيب من مادة وليزر لتشغيل أشكال سطحية.

**الجدول 12 ـ 1**: موسّطات التشغيل ومعدّلات إزالة المواد المختلفة باستخدام عدة أنواع من الليزرات[16].

| المادة | الليزر | معدل التكرار (كيلو هرتز) | القدرة (واط) | طاقة النبضة (ميغا جول) | معدل المعالجة (مم$^3$/ ثا) | عدد العيّنات |
|---|---|---|---|---|---|---|
| زجاج سليكا* | Avia 266 | 30 | 0.6 | 0.020 | 0.0007657 | 196 |
| زجاج سليكا* | Q-3000 | 1.5 | 2.65 | 1.767 | 0.018488 | 473 |
| زجاج سليكا* | GEM-100 | 5 | 9 | 1.80 | 0.089202 | 2284 |
| زجاج سليكا* | Reg A | 250 | 0.6 | 0.002 | 0.000039 | 1 |
| زجاج سليكا♦ | Avia 266 | 30 | 0.6 | 0.020 | 0.014379 | 345 |
| زجاج سليكا♦ | Q-3000 | 1.5 | 2.65 | 1.767 | 0.027489 | 660 |
| BK7 | GEM-100 | 250 | 0.6 | 0.002 | 0.000042 | 1 |
| BK7 | Avia 266 | 60 | 0.55 | 0.009 | 0.001713 | 38 |
| BK7 | GEM 100 | 1 | 2 | 2.000 | 0.031612 | 694 |
| BK7 | Reg A | 25 | 0.09 | 0.004 | 0.000046 | 1 |
| كوارتز مصهور | Avia 266 | 30 | 0.84 | 0.028 | 0.010580 | 226 |
| كوارتز مصهور | Q-3000 | 1.5 | 2.65 | 1.767 | 0.019105 | 408 |
| كوارتز مصهور | GEM-100 | 5 | 9 | 1.80 | 0.098319 | 2100 |
| كوارتز مصهور | Reg A | 250 | 0.6 | 0.002 | 0.000047 | 1 |

* زجاج أشعّة فوق بنفسجية، ♦: زجاج أشعّة تحت حمراء

## تقانة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً

ثمة تقانة جديدة للإنتاج المحدود تقلِّص قيود التصميم التي تفرضها سيرورة التصنيع، هي تقانة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً (Laser Engineered Net Shaping) (LENS) التي تُعطي قطعاً معدنية ذات أشكال شبه نهائية مباشرة من تصميم أُنجز بمساعدة الحاسوب. فبتوضيعها للمعدن بسيرورة الإضافة، تُنتِج قطعاً ذات خواص تكافئ أو تفوق تلك التي تُنتَج بسيرورات التطريق الشائعة.

وخلافاً للتشغيل الميكانيكي، الذي يصنع القطعة من الخارج إلى الداخل، تُبنى القطع في هذه الطريقة من الداخل إلى الخارج. وهذا يمكّن المصمّمين من صنع نماذج مخبرية لقطع معدنية لها أشكال من الصعب أو المستحيل تشغيلها ميكانيكياً. يمكن بهذه الطريقة، مثلاً، صنع قطع رفيعة جداً يزيد طولها على 2.54 سم مع نسبة طول إلى قطر تصل حتى 1:70، في حين أن التشغيل الميكانيكي لا يمكّن من تحقيق نسبة تزيد على 1:10[17].

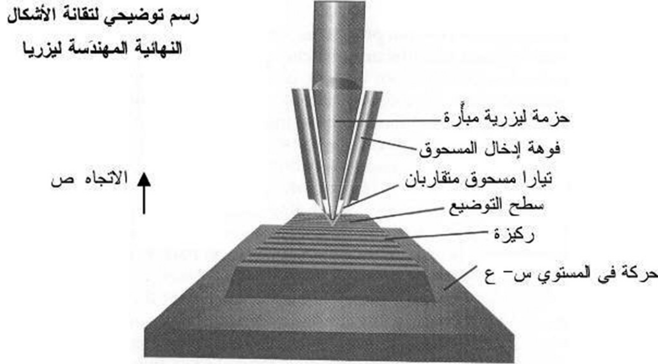
يُضاف إلى ذلك أنه من السهل تصنيع منتجات بها من مواد صعبة التشغيل كالتيتانيوم، وهي توضِّع تراكيب مواد كان توضيعها في السابق غير عملي أو مكلفاً جداً. إن هذه السيرورة تُنتج بخطوة واحدة بُنى متعدّدة المواد مع انتقال تدريجي في التركيب وإجهاد داخلي مهمل.

## أسس السيرورة

توزِّع آلات سيرورة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً، التي طُوِّرت أصلاً لدى مختبرات سانديا الوطنية الأميركية، مساحيق المعدن وفقاً لأنماط تفرضها نماذج ثلاثية الأبعاد مصمّمة حاسوبياً. وبتوجيه من هذه النماذج الحاسوبية، يكوِّن النظام بُنى معدنية بتوضيعها على شكل طبقة تلو أخرى.

لابتداء السيرورة، تصدُم حزمة ليزر Nd:YAG عالية القدرة بقعة ضئيلة على ركيزة معدنية مولِّدة حوضاً مصهوراً. وتنفخ فوهة مقداراً محدّداً بدقة من مسحوق المعدن في الحوض لزيادة حجم المادة. وتُبنى طبقة وفقاً للشكل الحاسوبي مع تحريك النظام الحامل للركيزة تحت حزمة الليزر في المستوي س ـ ع. وتتكرر سيرورة الصدم الليزري والترسيب حتى اكتمال الطبقة. بعدئذٍ يُوجَّه الليزر في الاتجاه

ص حتى تتراكم الطبقات المعدنية وفقاً للنموذج الحاسوبي (انظر الشكل 12 ـ 12).




**الشكل 12 ـ 12: تصطدم حزمة ليزر** Nd:YAG **عالية القدرة بقعة صغيرة على ركيزة معدنية، فتكوِّن حوضاً مصهوراً. وتنفخ فوهة مجاورة مقدار محدَّداً تماماً من مسحوق معدن في الحوض لزيادة حجم المادة.**

يُجرى توضيع الطبقات في حجرة محكمة الإغلاق، حيث توجد سيطرة تامة على المتغيّرات البيئية. على سبيل المثال، يمكن أن تحتوي الحجرة على جو من الأرغون لا تتجاوز نسبة الأُكسجين فيه 10 بالمليون. وهذا ضروري حين صنع قطع من الألمنيوم، لأنه إذا ابتُليت القطعة بالأُكسيد، فإنه يمنعها من تبليل الطبقة التي يجري توضيعها. فبسبب الجو الخالي تقريباً من الأُكسجين في الحجرة، يُنتِج النظام قطع ألمنيوم لا يمكن صنعها بالطرائق المعتادة.

يمكن استعمال مواد مختلفة في هذه السيرورة منها التيتانيوم والفولاذ العديم الصدأ وفولاذ الأدوات والكوبالت وخليطة الإنكونل (Inconel) التجارية. تبرد هذه المعادن بسرعة وتتصلَّد في بُنى ميكرويّة ناعمة الحُبيْبات. وهي تتصف بمقاومة شدّ أكبر من تلك التي لمواد التطريق، مع عدم انخفاض في اللّدانة (انظر الجدول 12 ـ 2).

### مزايا السيرورة

إضافة إلى خواص المواد الجيدة، تحقِّق سيرورة الأشكال النهائية المُهندَسة ليزرياً مزايا أخرى مقارنةً بتقنيات التصنيع الأخرى. فخلافاً للتشغيل الميكانيكي، الذي يُزيل المادة من كتلة من المعدن، تضيف هذه الطريقة المادة حيثما تكون ثمة حاجة إليها فقط، وهذا يلغي البقايا والنفايات. وهي تصنع القطع مباشرة من النموذج الحاسوبي من دون خطوات وسيطة. وهذا يخفِّض تكاليف الإنتاج ومدة تطوير المنتج والمدة الفاصلة بين البدء بالتطوير وبدء التسويق.

**الجدول 12 ـ 2**: خواص المواد

| نوع المادة | مقاومة الشدّ النهائية (كيلو باوند/ إنش$^2$) | إجهاد بدء التشوّه (كيلو باوند/ إنش$^2$) | الاستطالة (نسبة مئوية في قطعة طولها 1 إنش) |
|---|---|---|---|
| فولاذ 316 عديم الصدأ* | 115 | 72 | 50 |
| فولاذ 316 عديم الصدأ◆ | 85 | 35 | 50 |
| إنكونل* 625 | 135 | 84 | 38 |
| إنكونل◆ 625 | 121 | 58 | 30 |
| *Ti-6Al-4V | 170 | 155 | 11 |
| ◆Ti-6Al-4V | 130 | 120 | 10 |

* : مصنوعة بطريقة الأشكال النهائية المهندسة ليزريا، ◆: مصنوعة بالتطريق.

وهي توضِّع تراكيب من معادن مختلفة لتكوين القطع المتعدّدة المواد. وهذا يمكِّن المصمّمين من استخدام مواد مختلفة لأجزاء القطعة المختلفة وفق المتطلبات. ليس على المصمّمين بناءً قطعة كاملة من مادة عالية الكلفة مقاوِمة للاهتراء، بل يستطيعون ترسيب المواد المقاومة للاهتراء على سطوح القطعة حيث ثمة حاجة إليها، مع استخدام مواد أرخص داخل القطعة.

تأمَّل في قطعة دوَّارة يجب أن تكون قوية في نقطة وصلها في المركز وخفيفة الوزن عند الحواف الخارجية. في بعض الحالات، يمكن للمصمّم أن يغير من الشكل الهندسي للقطعة لتحقيق المواصفات المطلوبة، إلا أن اعتبارات قابلية التصنيع يمكن أن تحد من حرية المصمّم. باستخدام الطريقة الجديدة، لا ضرورة لتغيير الشكل الهندسي للقطعة، لأنه يمكن للسيرورة أن تبني قطعة من مادتين تعطيان مركزاً قوياً وحواف خارجية خفيفة الوزن.

ويمكن للسيرورة الجديدة أن تُنتِج انتقالاً حاداً أو متدرّجاً من مادة إلى أخرى. يوصى بالانتقال التدريجي عندما يكون الفارق في مُعَامل التمدّد الحراري بين المادتين كبيراً. خذ على سبيل المثال قالباً من النحاس والفولاذ. يتمدّد النحاس بمثلَي ما يتمدّد به فولاذ الأدوات حين تسخينهما. فإذا كان في القالب انتقال حاد بين المادتين، فإن ملتقاهما سوف يشهد مقداراً هائلاً من الإجهادات الناجمة عن تغيّرات القالب الحرارية في أثناء عملية القولبة.

### سيرورة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً بوصفها أداة

حين تطوير معظم المكوِّنات المعدنية، يصنع المصمِّمون غالباً نماذج مخبرية لتقييم شكل المنتَج وملاءمته لوظيفته. إلا أن معظم أعمال النمذجة المخبرية السريعة الشائعة تقوم على استخدام الورق والبوليمر والسيراميك والمعادن المسامية. وتعمل هذه النماذج جيداً لدراسة شكل المنتج وتوافقه من حيث الأبعاد والتوضيع. لكنها في معظم الأحيان لا تنجح في الاختبارات الوظيفية لأن موادها ليست هي التي سوف تُستخدم في المنتَج الفعلي.

مقارنةً بسيرورات النمذجة الأخرى التي تُنتِج أجزاء يجب في النهاية إعادة صنعها بطريقة أخرى، فإن سيرورة الأشكال النهائية المُهندَسة ليزرياً يمكن أن تتعامل مع الإنتاج المحدود. فالنماذج

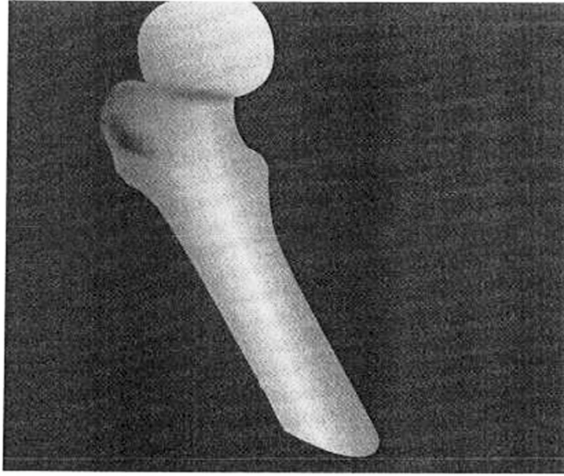
الأولية المعدنية الجاهزة كلياً من الناحية الوظيفية والتي تُولَّد بالتصميم بمساعدة الحاسوب تتيح للمصمِّمين تطوير تصاميم مبتكرة، إضافة إلى تعديل أو إعادة تصميم نماذج موجودة لاختبار تغييرات التصميم. وليس على المصمِّمين صنع قطع جديدة كلياً مع كل تغيير طفيف في التصميم.

ويُصنع كثير من المنتجات النهائية ذات الكمية المحدودة من مواد متخصِّصة صعبة التصنيع. واستخدام أدوات الإنتاج الكمي ذات التكاليف الباهظة في تصنيعها لا يمكن تبريره. لذا تُنتَج هذه القطع غالباً بسيرورات يدوية مكلفة. أما آلات سيرورة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً المؤتمتة فتمكِّن من إنتاج أعداد صغيرة من القطع المعدنية بسرعة وبتكلفة مقبولة في مختلف أنواع الصناعات.

وخلافاً لعمليات التفريز والتشغيل المعروفة الأخرى، يمكن لتلك الآلات أن تصنع قطعاً لها طيف واسع من الأشكال الهندسية الداخلية المعقّدة، ومنها البُنى الداخلية المجوّفة أو التي لها شكل أقراص العسل. تكون هذه القطع أخفّ من نظيراتها الصماء، ومع ذلك تكون قوية بما يكفي لمتطلبات التطبيق.

وثمة حاجة كبيرة متزايدة إلى قطع طبية قابلة للزرع في الجسم خفيفة الوزن من خلائط التيتانيوم القوية التي تُشكَّل باستخدام سيرورات الحِدادة. فعدد استبدالات الورك والركبة، مثلاً، يُتوقع أن يصل إلى 000 650 استبدال لكل منهما بحلول عام 2006 في الولايات المتحدة. وكثير من هذه الاستبدالات هو في الواقع استبدال لأعضاء صناعية تالفة. لذا، ولتحسين تصميم وخواص الأعضاء المزروعة، تقوم شركة Optomec Inc.[18] بتطوير تقانة دقيقة قائمة على الليزر لتوضيع خلائط التيتانيوم لصنع قطع معقّدة ثلاثية الأبعاد. إن التوضيع الليزري يوفّر خيار إضافة مادة إلى قطعة ابتدائية بدلاً من إزالتها

بالتشغيل الميكانيكي، وهذا يقلِّص النفايات (المهمة في حالة التيتانيوم الغالي الثمن)، ويمكِّن من تحقيق مفاهيم تصميم جديدة (انظر الشكل 12 ـ 13). وقد حصل فعلاً تسويق تقانة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً لتوضيع أشكال ثلاثية الأبعاد من مساحيق معدنية مختلفة. سوف تمكِّن هذه التطويرات الشركة من تطوير سيرورة أعلى سرعة بكثير للتوضيع المنخفض التكلفة لخلائط التيتانيوم بخواص ميكانيكية استثنائية.



**الشكل 12 ـ 13: عظم فخذ صنعي من التيتانيوم صُنع بتقانة الأشكال النهائية المهندَسة ليزرياً.**

لقد كان تطوير هذه التقانة بغية تحديث الآلة الموجودة، وتطوير العتاديات والبرمجيات لرأس توضيع خماسي أو سداسي المحاور يستطيع الانتقال والدوران لتوضيع المادة من أي اتجاه، وتحقيق فهم للعلاقة بين ظروف المعالجة وبنية المادة الميكرويّة وخواصها الميكانيكية المتعلقة بخلائط التيتانيوم الموضَّعة، وإيجاد طرائق

لخفض تكاليف المواد الأولية. فإذا تم تطوير هذه الآلة المقترحة وتسويقها بنجاح، فإنها سوف تمكِّن من التصنيع المنخفض التكلفة لمكوِّنات من التيتانيوم عالية الجودة، ومن تحقيق مزايا طبية تبلغ قيمتها ملياري دولار خلال عشر السنوات القادمة، من خلال تخفيض عدد العمليات الجراحية لاستبدال القطع المزروعة التالفة وتحسين تصاميمها وخواصها الميكانيكية. ويمكن استخدام الآلة أيضاً في البناء السريع للنماذج المخبرية ولإنتاج قطع ثلاثية الأبعاد مصنوعة من مواد أخرى كالفولاذات والخلائط التخصُّصية الفائقة. ويمكن للطريقة الجديدة أن تُنتِج أيضاً مكوّنات لصناعات البتروكيماويات والدفاع والسيارات وغيرها من الصناعات الأخرى[19].

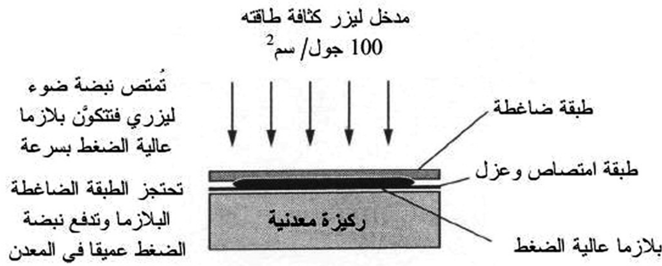
### التقسية السطحية

التقسية السطحية بالليزر (Laser Surface Peening) (LSP) هي سيرورة تُسلَّط فيها نبضات حزمة ليزرية على سطح المعدن، فتولِّد موجة صدم مستوية تنتشر خلال القطعة المشغَّلة وتشوِّه طبقة المادة تشويهاً لدِناً دائماً. ويتميز التشوّه اللّدن والإجهاد الضغطي المتبقّي الناجمان عن الصدمة بكونهما أعمق كثيراً مما هو ممكن بواسطة معظم طرائق المعالجة السطحية الأخرى.

لقد أدّى التطوير الناجح للتقوية السطحية بالليزر إلى تسويق السيرورة من قبل شركة (Metal Improvement Co.) (MIC)[20]. وثمة عدة نظم للتقوية السطحية بالليزر، إلا أنها ليست مختلفة عن بعضها اختلافاً كبيراً. ومن تلك النظم النظام LLNL-MIC[20] القائم على ليزر جديد مكوّن من حاضنة زجاجية مشوبة بالنيوديميوم (Nd: Glass Slab) ويُحرَّض بمصباح ومَّاض (انظر الشكل 12 ـ 14).

تقوِّي عملية التقوية السطحية بهذا الليزر المعدن بتطبيق إجهاد ضاغط عليه يخترق السطح إلى مسافة أعمق بأربع مرات من تلك

الممكنة بطرائق التطريق الأخرى. ويترك الليزر أيضاً سطحاً أنعم مع سماحه بتطبيق القوة الضاغطة بدقة أكبر على النقاط المستهدفة، إضافة إلى تحسين مقاومة الحرارة في المادة الانتهائية.




**الشكل 12 ـ 14: تولِّد التقسية السطحية بالليزر إجهادات ضاغطة على عمق نحو 1 مم في المعدن المعالَج، أي أعمق بنحو أربع مرات مما يتحقَّق بالتقوية السطحية العادية بتطريق المعدن، ويمكنها زيادة عمر شفرات عنفة محرك الطائرة النفاثة بمقدار 10 مرات، على سبيل المثال.**

## حزمة الليزر المربعة

تنقل عملية التقوية السطحية الليزرية الفعلية كثافات طاقة من رتبة 50 ـ 250 جول/ سم$^2$ إلى سطح المعدن من خلال بقع الصدم الليزري التي تتراوح مساحاتها بين 3 و20 مم$^2$، مع مدة للنبضة الليزرية من رتبة 10 ـ 30 نانو ثانية. وتعطي البصريات التي طوّرتها الشركة MIC حزمة ليزرية مربعة المقطع ذات توزع للطاقة على مقطعها مسطح تقريباً (بعدم تجانسٍ جذر قيمته التربيعية يساوي 10 في المئة) عبر مسافة 1 م إلى مستوي الصورة ببقعة مساحتها ومدة بقائها وكثافة قدرتها تساوي تلك اللازمة لمعالجة المادة، على غرار سيرورة الطباعة الضوئية إلى حد ما. تجدر الإشارة إلى أن تقوية الألمنيوم سطحياً تتطلب كثافة قدرة ليزرية تساوي 60 جول/ سم$^2$

فقط، في حين أن الفولاذ العالي المقاومة يحتاج إلى 200 جول/سم$^2$.

يوفّر شكل الحزمة المربعة المقطع تغطية سطحية أعلى كفاءة مما توفّره الحزمة الدائرية المقطع، ويسمح توزُّع الطاقة المسطح بتطبيق القوة نفسها الضاغطة باستخدام ثلث القدرة اللازمة في حالة الحزمة ذات توزّع كثافة الطاقة الغوصي.

تُحدِث كل نبضة ليزرية نبضة ضغط يساوي $10^6$ باوند/إنش$^2$ على سطح القطعة بتوليد بلازما في طبقة رقيقة من شريط أو طلاء واقٍ على سطح المعدن. وتُمنع البلازما من التغلغل عبر السطح باحتوائها موضعياً بطبقة سماكتها تساوي 1 ـ 3 ملم من الماء «المانع»، وبذلك تنتقل موجة الصدمة مباشرة إلى سطح المعدن (انظر الشكل 12 ـ 14).

تبلغ تكلفة نظام التقوية السطحية، مع روبوتات تحديد مواقع المواد في أثناء المعالجة ونظم التحكّم الحاسوبية نحو 2 مليون دولار، أي ما يعادل 4 ـ 8 أضعاف تكلفة نظم تقوية سطوح المعادن المعهودة. إن التحكُّم الدقيق الموجود في سيرورة التقوية الليزرية سوف يوسِّع أيضاً نطاق استخداماتها المحتملة في مجالات من قبيل التشكيل المعدني لصفائح الأجنحة المصنوعة من التيتانيوم في الطائرات العالية الأداء، حيث لا يمكن لطرائق التقوية الأخرى تحقيقها. ومن التطبيقات الأخرى غير العسكرية أو الجوية، قيد التطوير، معالجة وتشكيل مكوّنات تُستخدم في خدمات الرعاية الصحية والمحطات النووية لتوليد الطاقة وآلات حفر آبار النفط.

وتُستخدم حالياً سيرورة التقوية السطحية بالصدمة الليزرية، التي طوّرتها إدارة مختبرات المواد والتصنيع التابعة للقوى الجوية الأميركية، لتقوية شفرات المحرّكات العنفية المتضرِّرة الخاصة

بالطائرات لتصبح مقاومتها للتعب أكبر بخمس مرات من مقاومتها الطبيعية. تؤدّي شفرات المحرّك المتينة إلى زيادة المناعة إزاء التأذي بالأجسام الغريبة، ومن ثَمَّ إلى تقليص الخطر الذي تتعرض له الطائرة وطاقمها، وإلى تخفيض تكاليف الصيانة.

قبل اختراع هذه الطريقة، وبغية تجنب القوى الجوية تعطل كامل أسطول الطائرات B-1، فرضت الفحص اليدوي لشفرات المراوح قبل كل طلعة جوية. وتضمّنت عمليات الفحص، المستنزِفة للوقت، التي تسبق كل إقلاع لطائرة مسح الحافة الأمامية لكل شفرة بكرات وقفازات قطنية، وحتى بحرير تنظيف الأسنان. فإذا اكتُشف أي نتوء، غُيِّرت الشفرة قبل الإقلاع.

يُستخدم في سيرورة التقوية بالصدمة الليزرية نبضة ليزر قوية لتطبيق إجهادات متبقية ضاغطة شديدة على السطح المعدني للحافة الأمامية للقطعة المشغَّلة. تقدح نبضة الليزر انفجاراً أو موجة صدمة في سطح القطعة المطلي خصيصاً لهذه الغاية. فيولِّد عندئذ توسُّع الموجة موجة صوتية راحلة (Ttraveling Acoustic Wave) مترابطة مع القطعة، ضاغطة (مقوّية) بذلك بنية المادة الشبكية. والنتيجة هي تحسين كبير في خواص التعب الناجم عن الإجهاد العالي التكرار في القطعة، وزيادة كبيرة في مقاومة الشفرة للتلف الذي تسببه الأجسام الغريبة.

لقد كانت نتائج اختبارات التعب الكثير التكرار المطبقة على شفرات عولجت بالتقوية بالصدمة الليزرية رائعة. تبلغ مقاومة التعب في شفرة مروحة عادية سليمة غير معالجة 690 ميغا باسكال، وباستخدام التقوية بالصدمة الليزرية، أمكن إعادة شفرة تالفة إلى حالتها الإنشائية الطبيعية.

جرت الاختبارات المذكورة بالتعاون بين قسم تقانة التصنيع

لدى القوى الجوية الأميركية والشركة General Electric Aircraft Engines . فقد طُبِّقت الاختبارات على شفرات تالفة عولجت بالصدمة الليزرية، وعلى أخرى جديدة غير معالجة. وكان أداء الشفرات التالفة التي عولجت بالصدمة الليزرية مكافئاً لأداء الشفرات الجديدة غير المعالجة، فقد استعادت مقاومتها للتعب التي تساوي 690 ميغا باسكال. وقد أثبت هذا الاختبار أيضاً أن التقوية بالصدمة الليزرية تستطيع تحسين أداء أسطول الطائرات بقدرتها على تقليص الأعطال الناجمة عن الأجسام الغريبة حتى ربع إنش في شفرات مراوح الطائرة F101، إن لم نقل أنه يمكن أن تلغيها كلياً.

صحيحٌ أن تكاليف استخدام التقانة الجديدة في الإنتاج كانت عالية نسبياً، إلا أن فوائدها فاقت كثيراً تكاليف الفحص اليدوي واستبدال الشفرات. فقد أدّى تخفيض معدَّل تأذِّي محرّكات الطائرة F-101 بالأجسام الغريبة إلى إلغاء الحاجة إلى الفحص اليدوي الذي يكلف أكثر من 10 ملايين دولار سنوياً. ودرأ أيضاً خسائرَ المحرّكات التي كانت تتجاوز 40 مليون دولار، على أقل تقدير، على مدى زمن حياة محرّك تلك الطائرة.

إن الفوائد المجنية من سيرورة التقوية بالصدمة الليزرية تفوق كثيراً الوفر الناجم عن إلغاء نفقات الفحص اليدوي قبل الطلعات الجوية، وعن درء فقدان الطائرة. فقد أدّى استخدام هذه التقانة إلى تجنب خسائر تقدّر بمئة مليون دولار. وإذا حُسب أثر السيرورة الجديدة على جميع محرّكات طائرات القوى الجوية، فإن الوفر الناجم يمكن أن يصل بسهولة إلى مليار دولار.

### اللحام بالليزر

استُخدم اللحام بالليزر بنجاح في تجميع علبة وغطاء وحامل التجهيزات الإلكتروبصرية في نظام التحكُّم بالمسافة في السيارات.

فقد كانت ثمة صعوبة في وصل الأجزاء معاً من دون إتلاف تجهيزات القياس الحساسة المثبَّتة على الحامل.

لنجاح اللحام، كان على مواد القطع الثلاث أن تكون متوافقة مع تقانة اللحام بالليزر. في ما يخص الحامل والعلبة، اختار المصمِّمون مزيجاً من البولي كربونات (Polycarbonate) (PC) مع البولي بوتيلين تِرفتالات (polybutylene terephthalate) (PBT) الذي يمتص ضوء الليزر ويحوِّله إلى حرارة. وفي ما يخص الغطاء، اختاروا نوعاً خاصاً من البولي كربونات يبدو أسوداً في الطيف المرئي، لكنه يسمح للأشعّة تحت الحمراء بعبوره.

لُحمت القطعة بالليزر على مرحلتين. **أولاً**، لُحم الغطاء الشفّاف ليزرياً مع الحامل الذي يمتص ضوء الليزر وينصهر، وهذا ما يؤدّي إلى ربط الحامل بالغطاء. وتوضع هذه المجموعة بعدئذٍ في العلبة التي تمتص ضوء الليزر فتلتحم بها.

إن الوزن النوعي الكبير، ومقاومة التآكل الممتازة، وتحمُّل درجات الحرارة المرتفعة، والتوافق الحيوي للتيتانيوم، هي خصائص تجعله مغرياً في كثير من الصناعات المختلفة (الجوية الفضائية، والدفاعية، والبتروكيميائية، والطبية). تُشغَّل قطع التيتانيوم عادةً من مواد مصبوبة أو مطرَّقة، أو أنها تُلحم بسيرورات ذات حرارة عالية تؤدّي إلى تشوّه كبير. يُعطي اللحام الغازي بالقوس الكهربائية بقطب التنغستين (Gas Tungsten Arc Welding) (GTAW) لحامات مقبولة، لكنه بطيء وغير اقتصادي. ويمكن للحام الغازي المعدني بالقوس الكهربائية (Gas Metal Arc Welding) (GMAW) أن يزيد المردود وأن يقلِّص التكاليف، لكنه لا يُنتِج لحامات عالية الجودة عند سرعات معالجة كبيرة. تأتي مثالب سيرورتي اللحام الغازي المعدني بالقوس الكهربائية واللحام الغازي المعدني النبضي بالقوس الكهربائية

(Pulsed Gas Metal Arc Welding) (GMAW-P) من عدم استقرار القوس الكهربائية، وعدم استقرار موقع بقعة المهبط (قضيب اللحام) في حوض اللحام عند سرعات المعالجة العالية.

تُسمّى السيرورة الناجمة عن ضم اللحام بالحزمة الليزرية إلى إحدى السيرورتين، GMAW أو GTAW، باللحام الهجين. لقد استُقصي اللحام الهجين كثيراً باستخدامه مع طيف واسع من المواد خلال بضعة العقود السابقة. واستُخدمت في معظم بحوث اللحام الهجين استطاعات ليزرية عالية لزيادة سرعة الانتقال والاختراق. وفي حين أن اللحام الهجين بدا مستقراً في تلك الاستقصاءات، لم يكن ثمة أي عمل فيها لاستقصاء ظروف الليزر التي تجعل الـ GMAW-P مستقراً أيضاً. إذا أمكن جعل السيرورة GMAW-P مستقرة مع نظام ليزر تكلفته منخفضة جداً، فإن تصنيع التيتانيوم يمكن أن يزداد[21].

بيَّنت التجارب الأخيرة حصول تغيُّر كبير في جودة اللحام حينما أضيفت طاقة الليزر إلى لحام التيتانيوم بالـ GMAW-P. لقد نُفِّذ هذا العمل باستخدام وحدة تغذّية اللحام GMAW من شركة Lincoln Electric PowerWave 455/STT، وليزر الـ Nd:YAG طراز 4006D من شركة Trumpf /Haas. يمكن لليزر 4006D، المحرَّض بالمصباح، أن يولِّد قدرة مقدارها 4 كيلو واط على شكل موجة مستمرة عبر ليف ضوئي قطره يساوي 0.6 مم. واستُخدمت منصة متحكَّم فيها حاسوبياً رباعية المحاور لتأمين الحركة. ورُكِّب رأس تبئير حزمة الليزر ومشعل اللحام GMAW-P على المحور الشاقولي. وكان رأس تبئير الليزر معامداً للاتجاه الشاقولي، في حين أن المشعل كوَّن معه زاوية تساوي 31 درجة. وأجريت تجارب لحام شريطي على صفيحتين من الـ Ti-6Al-4V سماكتهما 6.35 ملم بتحريكهما في المحور س. واستُخدم المغذّي الذي يحتوي على 10 أسلاك لحام

من شركة Lincoln Electric لتغذّية سلك لحام من النوع ERTi-5 قطره 0.889 ملم إلى المشعل طراز Binzel 401D . ووفَّر منفّث غاز مع غطاء تجريبي مقاسه 50 ملم × 60 ملم أرغوناً صافياً بمعدّل تدفّق مقداره 65 قدم$^3$/ساعة. واستُقصي مجال واسع من قدرات الليزر بغية جعل اللحام مستقراً، وتحقَّق الاستقرار عند قدرة ليزرية منخفضة، وهذا شيء لم يكن متوقعاً.

لتحديد مجال العمل المستقر للسيرورة، أُجريت مجموعة كبيرة من الاختبارات. واستُخدم التسجيل الفيديوي السريع مع نظام تحصيل بيانات لمراقبة السيرورة وللمساعدة على تحديد متى تكون السيرورة مستقرة. والتقط الفيديو بيانات بمعدل 000 12 عيّنة في الثانية، وعمل نظام التحصيل بمعدّل 000 24 عيّنة في الثانية. واستُخدمت في التجارب مسافات تبئير مختلفة (100 و150 و200 مم) لتكوين بقع تبئير مختلفة المقاسات (0.3 و0.045 و0.6 و3.18 و5.58 مم). وضُبطت قدرة الليزر وفقاً لمقاسات البقع تلك إلى أن استقرت القوس الكهربائية.

وبيَّنت النتائج أن من الممكن استخدام ليزر منخفض القدرة والتكلفة مع GMAW-P لتكوين لحامات سريعة منخفضة الحرارة على قطع من خلائط التيتانيوم. وكان لتلك النتائج تأثير كبير في القرارات الاقتصادية بخصوص تشغيل أو تصنيع مكوِّنات لعدد من التطبيقات المستقبلية المختلفة. إن استخدام الليزر ذي القدرة المنخفضة جداً والمنخفض التكلفة يمكِّن من تحقيق لحامات مسطّحة ومتعدّدة التمريرات على خلائط التيتانيوم، بتكلفة قليلة. ويمكن لهذا أن يُخفِّض كثيراً تكاليف تصنيع القطع التيتانيومية، وأن يجعل مواد التيتانيوم مرغوباً فيها ليس في التطبيقات العسكرية والجوية الفضائية فحسب، بل في السيارات والمنتجات الاستهلاكية أيضاً.

وأدت الاستقصاءات والتطويرات المستمرة لهذه التقنية إلى عدد من الاستنتاجات المهمة، ومنها تحديد الاتجاهات التي تحتاج إلى مزيد من العمل فيها. فثمة حاجة إلى الفهم الجيد للعلاقة بين مقاس بقعة الليزر وطاقة الحزمة واستقرار المهبط بغية معرفة محدوديات هذا النهج. بهذا الفهم قد يكون من الممكن أيضاً نقل هذا النهج إلى خلائط أخرى لم يُلاحظ فيها هذا الاستقرار عند قدرات ليزر منخفضة. ونظراً إلى أن قدرة الليزر منخفضة، وإلى أن مقاس بقعة الليزر كبير، قد يكون من الممكن استخدام ليزرات الثنائيات المنخفضة التكلفة، أو حتى «ضوء أبيض» مبأَّر للحصول على نتائج مماثلة.

## معالجة السطوح ليزرياً

إن الغرض من تقانة معالجة السطوح ليزرياً (Laser Surface Treatment)[22]، أو الخلط السطحي ليزرياً (Laser Surface Alloying) (LSA)، هو إضافة عناصر إلى سطح مادة لتحسين بعض الخواص فيه.

يمكن للمعدن الذي سوف يُخلط مع سطح الركيزة أن يُطلى عليها بطرائق مختلفة، منها التبخير بالتخلية، أو التلبيس، أو التغشية بالمسحوق، أو تطبيق الغشاء الرقيق، أو الزرع الشاردي. ويمكن أيضاً أن يُطبق المعدن المضاف على شكل مسحوق وذلك ببخه من منفَث على الصُهارة. إن تقنيات المسحوق مفيدة جداً مع ليزرات غاز ثاني أُكسيد الكربون، لأن المسحوق يزيد من مُعَامل الامتصاص. وباستخدام تقنيات النشر في الحالة السائلة، يمكن للمعالجة الليزرية أن تعطي خليطة سطحية بمزج العناصر المضافة مع الركيزة حتى أعماق تتراوح بين بضعة أجزاء من الميكرون وبضع مئات من الميكرونات.

ويحصل أفضل مردود لليزر النبضي في حالة ليزر حاضنة ياقوت الياغ المشوبة بالنيوديميوم (Nd: YAG Ruby) أو ليزر حاضنة الزجاج المشوبة بالنيوديميوم (Nd: Glass). أما أفضل ليزر موجة مستمرة فهو ليزر غاز ثاني أُكسيد الكربون. باستخدام ليزر غاز ثاني أُكسيد الكربون، ثمة حاجة إلى قدرات من رتبة عدة الكيلو واطات بغية صهر المادة صهراً ملائماً.

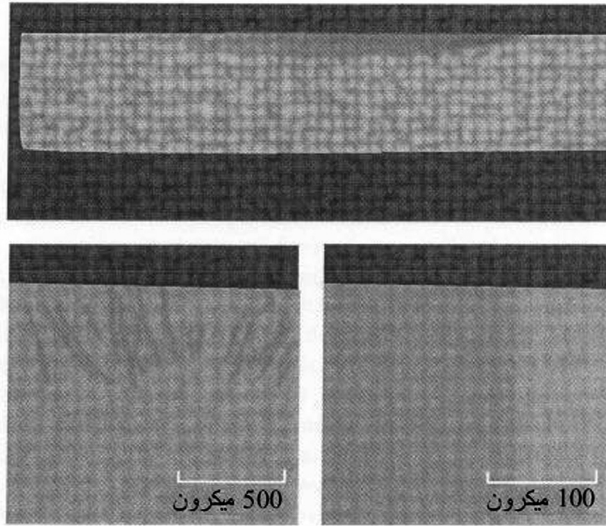
إحدى مزايا ليزر غاز ثاني أُكسيد الكربون ذي الموجة المستمرة هي أنه يمكِّن من التحكُّم بالمدة التي تكون فيها نقطة على الركيزة على تماس مع الحزمة الليزرية. تعتمد تلك المدة على قطر الحزمة وعلى سرعة حركتها بالنسبة إلى المادة. عندما يكون قطر حزمة الليزر كبيراً وسرعة حركتها صغيرة، تكون مدة التماس مع بقعة الليزر طويلة. ومع ازدياد مدة التماس، يزداد الاختراق مؤدياً إلى تخفيف التركيز عند السطح.

يمكن على سبيل المثال استخدام معالجة السطوح ليزرياً لخلط الكروم والموليبدن والنيكل مع سطح ركيزة من خليطة حديدية لتحسين قساوته ومقاومته للاهتراء والتآكل. وإضافة إلى الخلائط الحديدية، دُرست خلائط التيتانيوم لتطبيق تقانة معالجة السطوح ليزرياً عليها أيضاً.

يتصف الخلط السطحي ليزرياً بمزايا كثيرة مقارنةً بالخلط الكتلي. إذا كانت ثمة حاجة إلى مقاومة تآكل كبيرة، فإن المعالجة السطحية الليزرية تُعتبر طريقة جيدة للنظر في استخدامها. فعوضاً عن صنع القطعة كلها من خليطة جيدة، يمكن صنعها من معدن صافٍ ثم يُخلط السطح في ما بعد، وهذا يقلِّص التكلفة والجهد المبذول. وهذه السيرورة أكثر كفاءة من حيث الموارد أيضاً، لأن الخلط السطحي يتطلب قدراً من العنصر الخالط الغالي أصغر مما يتطلبه الخلط الكتلي.

إلا أن للخلط السطحي الليزري مثالبه أيضاً. فالقطع المخلوطة السطح ليزرياً تتصف بعمر تعب قصير وبمقاومة أصغر بسبب الإنهاء السطحي الخشن الذي ينجم عندما تتصلّد الخليطة المنصهرة. في تجربة على عيّنات من الـ Ti-6Al-4V، وجد الباحثون أنه بعد أن تصلَّدت المادة المنصهرة، أصبحت مقاومتها للتعب تساوي نصف مقاومة عيّنة مصقولة، وأن عمر التعب فيها أصبح أقصر بمئة مرة.

باستخدام التقانة الحالية لتقوية السطح ليزرياً (LSP)، يمكن معالجة السطوح حتى عمق بضعة ميليمترات (انظر الشكل 12 ـ 15). وخلافاً للخلط السطحي الليزري، فإن معظم سيرورات التقوية السطحية ليزرياً لا تصهر المعدن، بل تعالج السطح حرارياً.




**الشكل 12 ـ 15: تُعالج حرارة الليزر السطحية المعدن من دون صهره. ويمتد عمق المعالجة من مجال الميكرون حتى نحو 2 مم، ويمكن تركيز التسخين في مواضع معينة ثمة حاجة إلى تحسين خواصها.**

يمكن قَصْر هذه المعالجة على مساحة معيّنة من القطعة، مع ترك المساحة المتبقّية في حالتها الأصلية. وفي كثير من الأحيان يمكن زيادة مقاومة الاهتراء بالتقوية السطحية ليزرياً من دون الإضرار بمقاومة الشدّ. أما الطاقة اللازمة للمعالجة الليزرية فتقل كثيراً عن تلك اللازمة للمعالجة في الأفران. وإذا كانت القطعة كبيرة أو ذات شكل معقد، فقد يكون من الضروري شراء فرن جديد لمعالجتها بالطرائق العادية. ويجب أن تكون أوعية التبريد كبيرة بقدر يكفي لاحتواء القطعة، وهذا يجعلها مع الفرن نظاماً كبيراً شديد الإزعاج.

من التطبيقات العملية للتقوية السطحية الليزرية تقسية محامل عمود المَرافق (Crankshaft). يمكن لعمود المَرافق أن يكون كبيراً جداً، لذا يجب أن تكون المحامل قاسية كي تقاوم الاهتراء. من الممكن تقوية المحمل بكامله، لكن هذا مكلف جداً. من ناحية أخرى، يمكن إجراء التقوية السطحية الليزرية على الجزء الصغير من عمود المرافق الذي يحتاج إلى قساوة شديدة، وبذلك يكون استهلاك الطاقة قليلاً جداً. يضاف إلى ذلك أن الإنفاق على شراء الليزر يمكن أن يُعوَّض، لأنه يمكن استخدامه في اللحام والقص وخلط السطوح.

وتمكِّن التقوية السطحية الليزرية أيضاً من السيطرة المباشرة على معدّلات تسخين وتبريد المادة. يمكن لليزر من الليزرات الشائعة أن يشعِّع سطحاً بكثافة قدرة تساوي $10^6$ واط/سم$^2$. لإدراك ما ينطوي عليه هذا المقدار من القدرة، نبيِّن أن مقدار الطاقة التي يقدِّمها هذا الليزر في ثانية واحدة، يكافئ الطاقة التي يقدّمها مصباح قدرته 60 واط يوضع على بعد 10 سم من السطح المضاء مدة 242 يوماً. لذا، ونظراً إلى أن معدّل نقل الطاقة من الليزر إلى المادة كبير إلى هذا الحد، فإن كثيراً من المعادن لا تنصهر وفق ما هو متوقع لها. إن التسخين المفرط ممكن في كثير من الحالات، وهو يصل حتى

226.85 مْ في زرنيخ الغاليوم، لأن المادة تُسخَّن بسرعة كبيرة إلى حد يُبقي العدد الوسطي للإزاحات الذرّيّة صغيراً. أيضاً، ونظراً إلى أن الليزر يعالج مقداراً صغيراً جداً من المعدن، فإن النقل الحراري يُحدث تبريداً سريعاً جداً للمادة حين إبعاد حزمة الليزر عنها. ونظراً إلى أن معدّل التبريد كبير جداً في كثير من عمليات التقوية السطحية الليزرية، تبقى في السطح بُنى ناعمة التبلور أو حتى غير متبلورة.

إن التقوية السطحية بالليزر مفيدة جداً، إلا أن ثمة مثالب فيها. فعمق المعالجة محدود ببضعة ميليمترات فقط في أحسن الأحوال، وهذا قد لا يحقق معالجة كافية في تطبيقات معيّنة. لكن ثمة مقدار كبير من البحث المستمر في هذا المجال، والسيرورات قيد التحسين.

## التزجيج والإكساء

تدفع التشريعات البيئية المتزايدة، وتكاليف التخلُّص من النفايات المتصاعدة، إلى البحث عن تقانات اقتصادية بديلة للطلي بالكروم. وقد سلَّط أحد برامج البحث والتطوير، في مجال استبدال الكروم، الضوء على سيرورتي طلاء قائمتين على الليزر، هما الإكساء والتزجيج الليزريين، لتطبيق طلاء متجانس سميك (5 ـ 25 ميلي إنش) ذي خواص ميكانيكية مشابهة على الأقل لتلك التي لطلاء الكروم القاسي (المبتل). وقد نُفِّذ هذا العمل باستخدام ليزر ثاني أُكسيد كربون، ذي موجة مستمرة طولها 10.6 ميكرون، وحزمة قدرتها متجانسة على مقطعها العرضاني.

يُستخدم طلاء الكروم المعهود لتحقيق طيف واسع من السماكات تبعاً للتطبيقات المختلفة. يمكن استخدام الطلاء الرقيق بالكروم (1 ـ 10 ميلي إنش) للحماية من التآكل، في حين أن طلاء

الكروم السميك (10 ـ 40 ميلي إنش) يُستخدم غالباً لترميم السطوح المهترئة نتيجة للاستخدام الطويل الأجل. إن التحدّي الكبير الذي يواجه تطوير سيرورة بديلة للطلاء بالكروم هو إيجاد سيرورة تحقّق بمفردها معظم، إن لم نقل كل، الخواص التي يحققها الكروم كالقساوة والالتصاق ومقاومة التآكل والتزليق والإنهاء السطحي وقابلية ترميم السطوح المهترئة. إن تحقيق واحدة أو اثنتين من هذه الخصائص سهل نسبياً، أما تحقيقها جميعاً في الوقت نفسه، فهي مهمة صعبة.

لقد بيَّن العمل، الذي أُجري لدى مختبرات بحوث القوى الجوية الأميركية ومخبر تقييم المواد المصلّدة ليزرياً، والذي تضمن كلاًّ من الإكساء والتزجيج الليزريين بطلاءات مبخوخة حرارياً، أن المعالجة الليزرية هي سيرورة عملية ومجدية لإنتاج طلاءات جيدة التصليد ومقاومة للتآكل والاهتراء. والسمة المشتركة بين السيرورتين هي أن كلاً منهما يصهر طبقة الطلاء مُقلِّلاً مساميتها ومُغلقاً السطح بإحكام ليصبح كتيماً للهواء والماء، وهذه متطلبات مهمة لدرء تأكُّل المعدن المطلي. وبيَّنت النتائج أيضاً أن هذه الطلاءات المعالجة ليزرياً تحقّق معظم متطلبات الأداء التي يحققها حالياً طلاء الكروم المرسّب كهربائياً، خاصة حينما يكون الترميم بسماكات كبيرة ضرورياً.

باختصار، لقد بيَّن هذا العمل أنه يمكن تطبيق طلاءات ببخ الشعلة بنجاح على ركيزة، ثم تزجَّج ليزرياً لتكوين طلاءات ممتازة ذات كثافة عالية ومقاومة للتآكل والاهتراء. وقد أُجري التزجيج الليزري الناجح على قضبان مطلية بالخليطة Versalloy-50، وعلى أخرى مطلية بمزيج من الـ Versalloy/WC-Co. وكانت قابلية السيرورة لتكرار الإنتاج بالمواصفات نفسها أكبر كثيراً في حالة المزيج الذي انصهر عند درجات حرارة أعلى كثيراً وأدّى إلى تسخين

أشدّ للركيزة. وتبيَّن أيضاً أن لسيرورة التزجيج الليزري تأثيراً قليلاً جداً في البنية الميكرويّة للركيزة المزججة، وأن جودة الطلاء المبخوخ حرارياً تؤدّي دوراً مهماً في تحديد جودة الطلاء المزجّج ليزرياً. وقد أدت البُنى الميكرويّة الناجمة عن التزجيج بطلاء الـ Versalloy/WC-Co إلى ذوبان جزئي للكربيدات في حاضنة غنية بالنيكل. وكوَّن هذا طلاء قوياً جداً كتيماً مقاوماً للتآكل ويمكن أن يتحمَّل الدورات البيئية جيداً.

وثبت أيضاً أن الإكساء الليزري يمكن أن يكون بديلاً عملياً لطلاء الكروم. فقد كوَّنت هذه السيرورة طلاءات عديمة المسامات جيدة الالتصاق بسماكات مختلفة على ركائز متنوعة. وأعطت تجارب الإكساء نتائج أفضل باستخدام مسحوق Versalloy-50 وحده من تلك التي نتجت حين استخدام مسحوق المزيج Versalloy/WC-Co. وبيَّنت اختبارات التآكل والاهتراء التي أُجريت على العيّنات المكسوة أداءً يشابه أداء طلاء الكروم.

وبيَّن هابل وزملاؤه[23] أنه قد أُجري ترميم ناجح لقطع مهترئة أو متضررة باستخدام التزجيج أو الإكساء الليزريين. فإمكان تطبيق طبقة ثانية من الطلاء من دون التسبّب في تكوُّن انقطاع في بنية المادة بين الطبقة الجديدة والطبقة الأصلية يوحي بأنه يمكن استخدام التزجيج أو الإكساء لترميم أو إصلاح القطع من دون الاضطرار إلى تنظيفها من المادة السابقة، وما يترتب على ذلك من تكاليف إضافية.

## الطلاءات

تاريخياً، تطوّرت الطلاءات وقطع المحرّكات العنفية التي تُطلى بها، كلٌّ على حدة. وقد كان أداء الطلاءات ممتازاً من حيث تحقيقها

لما صُمِّمت من أجله: إطالة عمر المحرّك العنفي من خلال حماية أجزائه من الأكسدة والتآكل والاهتراء بشظايا جُسيْمات الوقود، ومن الأخطار الممكنة الأخرى. إلا أن المهندسين يواجهون اليوم مشكلة. فمع توليد التقانات الجديدة لطيف واسع من المواد المقاومة للحرارة، أصبحت المحرّكات العنفية الآن تعمل عند درجات حرارة أعلى كثيراً مما كان شائعاً قبل عقد من السنين. وقد جعلت هذه الحاجة المستجدة من الحتمي أن يجري تطوير الطلاءات والركائز سويةً، لأن كلاً منهما يجب أن يرافق الآخر في الدخول إلى نظام درجات الحرارة المطَّردة الارتفاع. في هذه البيئة القاسية، يؤدّي انهيار أحد هذين المكوّنين إلى انهيار الآخر بسرعة. وفي الواقع، يشكِّل الطلاء والركيزة في بعض التصاميم المقترحة جسماً مستمراً لاحدود فيه بين السطح المرسَّب والمادة التي تحته.

في السنوات القادمة، يمكن للمحرّكات العنفية أن تصل إلى سقوف جديدة من الكفاءة ومدة الخدمة. وكي تواكب تقانة الطلاءات تلك التطوّرات، عليها أن تستمر في الابتعاد عن الطرائق القديمة المتبعة في تصميمها. والحد الأدنى هو أنه تجب مكاملة تصميم الطلاء مع تصميم القطعة الشامل، مع الأخذ في الحسبان تركيب الخليطة، وسيرورة التصنيع، وطريقة التبريد.

لقد تزايدت كفاءة العنفات الغازية على نحو مطَّرد طوال سنين عديدة، سواء كان ذلك لتوليد الطاقة الكهربائية، أو للتطبيقات البحرية، أو لنظم الدفع في الطائرات. وقد حصلت هذه التحسينات في المقام الأول لأنه تبيَّن أنه يمكن تشغيل مولِّد الغاز في المحرّك عند درجات حرارة متزايدة. سوف تستمر الحاجة إلى المحرّكات العنفية ذات المردود المتزايد، وهذا يتطلب كفاءة تشغيل أعلى وعمر تشغيل أطول، إضافة إلى انبعاثات أقل. لكن جزءاً كبيراً من الإسهامات في زيادة كفاءة التشغيل يأتي من مزيد من الارتفاع في

درجات حرارة التشغيل. تقتضي إطالة عمر المحرّك أن يعمل عند درجات حرارة منخفضة، عادةً، مع مزيد من التبريد لكتلته الساخنة، أو استخدام مواد إنشائية تتصف بطبيعتها بأداء عالٍ عند درجات الحرارة العالية. ونظراً إلى أن الخيارين الأولين يؤدّيان إلى انخفاض في المردود، فإن الخيار الأخير هو المفضَّل. إن تحقيق مردود أكبر عند درجات الحرارة المرتفعة يجعل من الحتمي حماية سطوح القطع لإطالة عمرها، وهذا يتحقّق بالتطوير المتزامن لمواد إنشائية وطلاءات متقدمة تحمي السطوح من التدهور البيئي.

## التوجهات في الطلاءات

### تصميم طلاءات درجات الحرارة العالية

في الماضي، كانت الطلاءات التي تعمل عند درجات الحرارة العالية تُختار في أكثر الأحيان بعد اكتمال تصميم القطعة. وحالياً، تتطلب التصاميم أن تتصف الركيزة (التي تكون عادةً من خلائط النيكل الفائقة) بمقاومة متأصّلة فيها كافية لمقاومة آليات التدهور بغية درء الانخفاض الكارثي في مدة الخدمة بسبب تلف الطلاء. لكن نظراً إلى أن المواد المقترحة لاستخدامها كركائز في المستقبل قد لا تتصف بمقاومة بيئية متأصلة فيها كافية عند درجات الحرارة العالية، فإن أهمية تحقيق الطلاءات أداءً جيداً سوف تستمر في الازدياد. في تصاميم العنفات المستقبلية، سوف يُنظر إلى تصميم الطلاء بوصفه جزءاً متكاملاً من سيرورة التصميم الكلية بغية تلبية المتطلبات الصارمة من حيث أداء النظام.

### أنواع طلاءات درجات الحرارة العالية

صحيحٌ أن ثمة أنواعاً كثيرة من طلاءات درجات الحرارة العالية قيد الاستخدام اليوم، إلا أنه يمكن تصنيفها في ثلاثة أصناف:

ألمنيومية (Aluminide)، وكرومية (Chromide)، ومختلطة مكوَّنة من MCrAlY، حيث M تعني معدن يتكوَّن عادة من الكوبالت أو النيكل أو من خليطة منهما. إن أهمية طائفة الطلاءات التي تعزل الركيزة عن سخونة ممر الغاز (أي طلاءات العزل الحراري) آخذةً في التزايد مع بدء استخدامها لتحسين الأداء. تتكوَّن طلاءات العزل الحراري من مواد سيراميكية (كالزركونيا المثبّتة جزئياً) تُطبق على طلاء لاصق مقاوم للأكسدة يُصنع عادة من مادة ألمنيومية أو من الـ MCrAlY.

### سيرورات تطبيق الطلاءات

ثمة عدد كبير متنوع من السيرورات المستخدمة لتطبيق الطلاءات، وهي جميعاً تعتمد على واحدة من ثلاث طرائق عامة: توضيع الأبخرة فيزيائياً، وتوضيع الأبخرة كيميائياً، والبخ الحراري. ترسِّب هذه الطرائق طيفاً واسعاً من الطلاءات التي تقع بين صنفين أقصيين هما الطلاءات المتغلغلة (Diffusion Ccoating) (أي إن العناصر الموضَّعة تنفذ في الركيزة في أثناء الطلاء) وطلاءات التغطية (Overlay Coating) (أي إن العناصر الموضَّعة تكون ضعيفة التغلغل في الركيزة). تلتصق الطلاءات المتغلغلة التصاقاً جيداً بالركيزة، إلا أنها مرونتها التركيبية محدودة. ففائدتها تعتمد كثيراً على كيمياء الركيزة. أما الطلاءات الكاسية، فتلتصق بالركيزة جيداً عادةً، وتتصف بمرونة تركيبية جيدة، إلا أنها أغلى وأكثر سماكة من الطلاءات المتغلغلة. والطلاءات العازلة حرارياً هي طلاءات كاسية، ولذا يمكن توضيعها على أنواع مختلفة من الركائز، إلا أن الصعوبة الرئيسة في استخدامها هي أن التغيّر المفاجئ في التركيب والخواص عند الملتقى بينها وبين الركيزة ينزع إلى تعزيز تشظّي طبقة السيراميك.

غالباً ما يُفضَّل توضيع البخار فيزيائياً بالحزمة الإلكترونية على

التوضيع البلازمي حين توضيع الطلاءات العازلة حرارياً على شفرات العنفات، لأنه يُنتِج سطحاً أملساً ذا جودة حركية هوائية أفضل مع تداخل أقل مع ثقوب التبريد في المحرّك. إلا أن سيرورة البلازما الواسعة الانتشار تتصف بمزايا عديدة منها تكلفة التوضيع المنخفضة وقابلية طلي أنواع كثيرة من المكوِّنات ذات التراكيب المتنوعة، إضافة إلى قاعدتها الصناعية الكبيرة الموجودة.

## أنماط التدهور

أحد الاعتبارات الرئيسة في اختيار نظام الطلاء هو تحديد مقدرته على توفير حماية ملائمة من آليات التدهور النشطة التي يعاني منها المكوِّن والناجمة عن البيئة في أثناء الخدمة. إن أنماط التدهور هذه تابعة لظروف التشغيل ولمادة المكوِّن الأساسية، ومن تلك الأنماط الشائعة بدرجات مختلفة في المقاطع الساخنة من المكوِّنات المصنوعة من الخلائط الفائقة: التعب الميكانيكي الحراري السريع، والتلف الناجم عن الأجسام الغريبة، وتعب التشغيل المديد، والأكسدة العالية درجة الحرارة، والتآكل الحار، والتشوّه الدائم تحت الحمل (الزحف).

ونظراً إلى استخدام جدران رقيقة ومواد مركَّبة تحقِّق أكبر مقاومة في شفرات عنفات محرّكات الطائرات ذات مجاري التبريد الداخلية، فقد اتصفت تلك الشفرات بمقاومة تأكسد عند درجات الحرارة العالية غير كافية لعملها المدة المقررة من دون استخدام الطلاء. لذا استُخدمت الطلاءات في تلك الحالات لإطالة المدة الفاصلة بين عمليات التعمير، وإطالة العمر الفاعل للمكوِّنات. صحيحٌ أن الجيل الأخير من الشفرات الأحادية البلّورة يتصف بمقاومة ممتازة للأكسدة مقارنةً بشفرات المحرّكات العنفية الصناعية

المعهودة التي تُصنع بالصبّ، وبشفرات عنفات محرّكات الطائرات المشوبة بقليل من الكروم، إلا أنها أشدّ حساسيةً للتآكل الحراري عندما يحصل تلف في الطلاء. أما شفرات المحرّكات العنفية الصناعية، التي تتكوَّن من جدران سميكة وخلائط أقل مقاومة للشدّ مع مقاومة تآكل أكبر، فتتصف عموماً بمدة خدمة طويلة نسبياً بعد تلف الطلاء.

وفي أثناء الخدمة، تتدهور الطلاءات على جبهتين: الملتقى بين الطلاء وممر الغاز، والملتقى بين الطلاء والركيزة. ويحصل تدهور الطلاء عند ملتقاه مع مسار الغاز نتيجةً لآليات التدهور البيئية. أما عند الملتقى مع الركيزة فيحصل تغلغل الحالة الصلبة عند درجات الحرارة العالية مؤدياً إلى تغيّر في تركيب المادة يمكن أن يغيّر خواص الركيزة ويفسد طلاء مناطق مهمة منها. وفي أسوأ الحالات، يمكن لتغلغل الطلاء في الركيزة أن يؤدّي إلى تكوُّن أطوار هشة ومن ثَمَّ إلى انخفاض شديد في مقاومة التعب.

### اعتبارات هندسية

بافتراض وجود حاجة إلى الطلاء، وأنه جرى تحديد نوع يوفِّر حماية بيئية كافية، فإن ثمة ستة عوامل هندسية مهمة يجب النظر فيها:

**1 ـ التوافُق الكيميائي (التعديني) (Chemical Metallugical Compatibility)**: يجب أن يكون الطلاء مستقراً بالنسبة إلى مادة الركيزة لدرء التغلغل المفرط في ما بينهما وتفاعلهما كيميائياً في أثناء مدة الخدمة. يمكن للطلاء غير المستقر أن يؤدّي إلى تدهور حراري لكل من الطلاء والركيزة بسبب انخفاض كل من درجة حرارة الانصهار ومقاومة الزحف، وظهور التهشُّش.

**2 ـ توافُق سيرورة الطلاء (Coating Process Compatibility)**: يمكن لمادة الطلاء أن تكون متوافقة كلياً مع القطعة، لكن سيرورة

الطلي قد لا تكون متوافقة. يحصل ذلك عادةً حينما تتطلب ظروف السيرورة درجات حرارة عالية، وهذا ما يقتضي معالجة سطحية خاصةً قبل الطلاء.

**3 ـ التوافق الميكانيكي (Mechanical Compatibility)**: تبقى الحماية التي يوفّرها الطلاء من الأكسدة والتآكل قائمة ما دام ملتصقاً بالركيزة وخالياً من التصدّعات. من الاعتبارات المهمة هنا أن يكون مُعَاملا التمدّد الحراري للطلاء والركيزة متوافقين، وأن يكون الطلاء قادراً على استيعاب الانفعال الداخلي ومترابطاً وملتصقاً بالركيزة. ويُعدُّ توافق التمدّد الحراري أهم العوامل، ويأتي بعده مباشرة تحمُّل الطلاء للانفعال.

4 ـ **قابلية القطعة للطلي (Component Coatability)**: إن قابلية توضيع طلاء على السطح المطلوب تابعة لشكل القطعة الهندسي ولحجمها، ولإمكانات سيرورة الطلي من حيث الوصول إلى ذلك السطح. على سبيل المثال، تعمل بعض السيرورات على أساس وجود خط نظر، ولذا لا تستطيع طلي المجاري الداخلية. وحجم القطعة مهم أيضاً لأن بعض السيرورات يجب أن تُجرى ضمن خزان أو مُفاعل مغلق. ويجب التحقُّق من القدرة على تطبيق طلاء متجانس، خاصة عند الحواف، وداخل الزوايا، وعند جوانب القطعة المنحنية غير المنتظمة. ويجب أيضاً الأخذ في الحسبان التغيُّرات الحاصلة بسبب الطلي في أبعاد القطعة والخواص السطحية.

5 ـ **الملوثات الموجودة في الهواء والوقود (والماء وبخار الماء في العنفات الصناعية) (Contaminants in Air and Fuel)**: يمكن للملوّثات أن تتجمع في الجزء الساخن من القطعة وأن تؤدّي إلى تأكُّل وحتٍّ وترسُّبات عند ظروف حرارية وضغطية معيّنة. وهي تسهم في تسريع تدهور القطعة عند درجات الحرارة العالية. لذا يجب وضع حدود لتراكيز الملوّثات المسموح بها بغية ضمان فاعلية الطلاء.

**6 ـ مستويات الانبعاثات من العنفة (Turbine Emission Levels)**:
يمكن لغاز العنفة، بوصفه جزءاً من سيرورة الاحتراق، أن يحتوي على انبعاثات ضارة. ومع تحسُّن سيرورة الاحتراق، تقلَّصت مستويات الانبعاثات. من هذه الانبعاثات، أول وثاني أُكسيد الآزوت، وأول أُكسيد الكربون، والهيدروكربونات غير المحترقة، وثاني وثالث أُكسيد الكبريت، إضافة إلى الجُسيْمات المعلقة. إن الطلاءات تؤثّر في الانبعاثات بتقليص الحاجة إلى هواء التبريد عموماً.

**إضافة إلى العوامل المتعلقة بانتقاء الطلاء الملائم، فإن العاملين الهندسيين العامين الآتيين على درجة من الأهمية**:

- قواعد البيانات المتوافرة لخواص الطلاءات والبُنى المطلية. تولَّد عادة بيانات الخواص الهندسية للطلاءات العالية درجة الحرارة بعد التوصيف التام للخواص الميكانيكية للركيزة غير المطلية. وتكون تلك البيانات عادة مخصَّصة لتطبيق وظروف معالجة معيّنة، إضافة إلى كونها محمية الملكية. أما بيانات الأداء الطويل الأجل (أي أداء القطع المطلية خلال مدد أطول من 000 50 ساعة مثلا) فهي قليلة وتخصّ تقانات قديمة.

- مَقيَسة الطلاءات. عموماً، لكل جزء من المقطع الساخن من المحرّك ثمة طلاء خاص مستمثل للظروف التي سوف يعمل فيها. لذا يجب إيلاء اهتمام كبير لاستمثال الطلاء لكثير من المكوِّنات بسبب تنوُّعها وتنوُّع خلائطها.

## عوامل مدة الحياة

تُصمَّم قطع الأجزاء الحارَّة كي تعمل عند أعلى درجات الحرارة والإجهادات الممكنة بغية جعل الأداء أفضل ما يمكن. ونتيجة ذلك، تتدهور تلك القطع باستمرار في أثناء الخدمة. إن معدّل حصول هذا

التدهور مهم لعمل القطعة، ومن ثَمَّ، لأداء العنفة الغازية وطول عمرها.

يتمثَّل دور طلاء الجزء الساخن في حماية الركيزة من بيئة الغاز، وتتجلى أهمية ذلك الدور في المدة الفاصلة بين عمليتي تعمير أو صيانة مقررتين. ينطوي تعمير القطعة طبعاً على جوانب اقتصادية وزمنية في عملية استعادة كفاءتها.

تتحدَّد أنواع التعمير الممكنة للقطع المطلية بعوامل الأمان والوثوقية أولاً، ثم بالجوانب الاقتصادية. لذا تختلف أنواع التعمير كثيراً اعتماداً على نوع القطعة التي سوف يجري تعميرها. صحيحٌ أن استبدال الطلاء يمثّل جزءاً صغيراً عادةً من عملية الإصلاح الشاملة، إلا أنه يمكن أن يكون على درجة من الأهمية لتحقيق مدة الحياة المقررة للقطعة بعد عودتها إلى الخدمة. لكن تنوُّع الطلاءات الواسع، والافتقار إلى تصنيفات معيارية لها، يزيدان من تعقيد مهمة الحفاظ على بنية المحرّك المطلية، وتزداد المهمة صعوبة مع دخول الطلاءات المتقدمة إلى الخدمة.

في الماضي، كان على الطلاءات أن تكون قابلة للإزالة وإعادة التطبيق، إلا أن هذا قد تغيّر ولم يَعُد متطلباً للعنفات الصناعية. إذا تحمَّل طلاءٌ العمل عند درجات الحرارة العالية (بغية تحسين المردود)، فإن الوفر الناجم عن انخفاض استهلاك الوقود سوف يعوِّض عن التكاليف الإضافية المترتبة على شراء مكوِّنات جديدة بدلاً من إصلاح القطع القديمة. من ناحية أخرى، سوف تواكب التوجهات المستقبلية الخاصة بإصلاح محرّكات الطائرات تلك التي تخصّ العنفات الصناعية، إضافةً إلى المزيد من التعقيدات الناجمة عن الجدران الرقيقة ومجاري التبريد التي هي أشدّ تعقيداً. يمكن للجدران الرقيقة في المكوِّنات المتقدمة أن تعوق إزالة الطلاء السابق،

وهذا ما يؤدّي إلى مكوِّنات غير قابلة للإصلاح، ومن أمثلتها كثير من الشفرات المستخدمة حالياً في المحرّكات النفاثة والعنفات العالية الضغط.

## توضيع الأبخرة كيميائياً

لقد ثبتت فاعلية تقانة الطلي بتوضيع البخار كيميائياً في تطبيق طلاءات على كل من السطوح الداخلية والخارجية على شفرات العنفات. إضافة إلى ذلك، وبفضل التحكُّم الحاسوبي في جميع متغيّرات السيرورة، فإن جودة تغلغل الطلاء فيها تفوق غالباً ما يمكن تحقيقه بواسطة تقانات الطلي الأخرى، حتى حين توضيع أشدّ المواد قابلية للتفاعل. وهذا مهم خصوصاً لتصميم أشكال الأغشية السطحية المستخدمة في التبريد الهوائي[(24)].

تعطي سيرورة الألمنة بتوضيع البخار كيميائياً المنخفضة النشاط تراكيز ألمنيوم منخفضة في الطلاء (أقل من 22 في المئةو)، ولذا يبدي الطلاء المُؤلمَن مستوى عالياً جداً من المطاوعة. وتجعل هذه المطاوعة الجيدة ما يسمّى الإنتاج «بالصب والطلاء» ممكناً: تُطلى المكوّنات في أثناء صبها، ثم تشغَّل وتُجمَّع.

وعموماً، يقاوم الطلاء تصدّعات التعب على نحو أفضل كلما رقَّ وازدادت مطاوعته. والطلاءات الناجمة عن توضيع البخار كيميائياً المنخفض النشاط أكثر مطاوعة من الألمنيوميات التغلغلية الشديدة الفاعلية المصنوعة بتوضيع الألمنيوم ومعالجته حرارياً في الوقت نفسه. ونظراً إلى أن الطلاءات المطبقة بتوضيع البخار كيميائياً تتصف بمقاومة أفضل للأكسدة والتآكل، فإنه يمكن للطلاء الرقيق أن يعيش طوال مدة حياة القطعة. لذا فإن مقاومة تصدّعات التعب في الطلاءات المنخفضة النشاط المصنوعة بتوضيع البخار كيميائياً تفوق كثيراً تلك

التي للطلاءات العالية النشاط. تجدر الإشارة إلى أن متطلبات الأداء الصارمة من أكثر تصاميم المحرّكات تقدما تقترب بسرعة من الحدود القصوى لمقاومة تصدّعات التعب التي تتصف بها الطلاءات الألمنيومية المنخفضة النشاط المصنوعة بتوضيع البخار كيميائياً[24].

يُعتبر الإعداد السريع للنماذج المخبرية ضرورياً لبرامج التطوير المتسارعة الهادفة إلى منتَج. ثمة نظام جديد لتوضيع الأبخرة كيميائياً، يستخدم الحقن المباشر بواسطة الأمواج فوق الصوتية، يُعطي المصمّمين أداة منيعة خصبة مجدية التكلفة لصنع نماذج مخبرية لتجهيزات تحتاج إلى أغشية رقيقة. يمكن استخدام النظام لصنع أغشية من مركبات معدنية عضوية وبوليمرات وسيراميكات ومعلقات نانوية الطَور. ويُستخدم في هذا النظام المسمى Thin Sonic تحكُّم محلي في السيرورة يتيح للمصمِّمين تكوين بُنى متنوِّعة من قبيل النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، والثنائيات العضوية المشعّة للضوء، وطلاءات الدارات المطبوعة، والعوازل الحرارية، والمُحِسَّات الكيميائية القائمة على الأمواج الصوتية السطحية، وشاشات اللمس، وكثير من دارات وتجهيزات الغشاء الرقيق الأخرى[25].

وخلافاً لنظم توضيع البخار كيميائياً الأخرى، تُستخدم في هذه السيرورة مادة أولية (معدن أو بوليمر أو طَور نانوي أو جُزَيء ضخم) تُرسل إلى فوهة الأمواج فوق الصوتية عبر سلسلة من الصمّامات المتحكَّم فيها آلياً بواسطة وشائع كهرومغنطيسية. وتحدِّد مضخّة قابلة للضبط بواسطة مكبس سيراميكي حجم المادة المنفوثة من المادة الأولية وتُرسلها إلى أنبوب مجمِّع. يمكن صنع أفلام بهذه السيرورة تصل سماكاتها حتى بضعة ميكرونات خلال بضع دقائق. ومن الأمثلة عن التطبيقات الحالية التي تستخدم هذه السيرورة النُسُج الحيوية الصناعية والمُحِسَّات الحيوية والرقاقات الإلكترونية الحيوية

والتجهيزات الفوتونية التي يحتاج جميعها إلى أغشية عضوية رقيقة لا يمكن تعريضها إلى الحرارة. ويمكن لسماكات هذه الأغشية أن تكون بين بضعة أنغسترومات والعديد من الميكرونات، وهي على درجة كبيرة من الأهمية للطب الحيوي والإلكترونيات.

بعد الهجوم على مركز التجارة العالمي، تركَّزت اهتمامات أمن المطارات في المُحِسَّات التي تستطيع كشف المتفجرات. وأحد المُحِسَّات المرشحة لذلك هو كاشف العوامل الكيميائية القائم على الأمواج الصوتية السطحية. إن هذه التجهيزات البلّورية الكهروضغطية تهتز اهتزازاً طنينياً في مجال الميغا هرتز، وحين طلائها ببوليمر ملائم، تلتقط جُزَيئات من المحيط.

لقد اختُبر التوضيع النبضي فوق الصوتي للبخار كيميائياً باستخدام كثير من المواد الأولية المختلفة المُنتِجة للأكاسيد. تذرِّر نبضات الأمواج فوق الصوتية قطيرات المادة الأولية التي يقل قطرها عن 15 ميكرون، فتتبخر كلياً في الخلاء قبل الوصول إلى الركيزة المسخَّنة. ويعطي النمو البلّوري، على أساس جُزَيء تلو آخر، أغشية رقيقة أحادية البلّورات عالية الجودة ضمن المفاعل المنخفض الضغط. من المواد المعدنية العضوية التي جرى اختبارها ثاني أُكسيد التيتانيوم $TiO_2$، وتنتالات الليثيوم $LiTaO_3$ وأُكسيد القصدير والإنديوم ITO، والزركونيا المثبّتة بالإيتريوم YSZ. وقد أمكن الحصول على سماكات للأغشية تصل حتى 45 ميكرون.

وثمة سيرورة جديدة تسمّى توضيع البخار كيميائياً بالفتيلة الساخنة استُخدمت لتوضيع طبقات نانوية من البولي رباعي فلور الإيثيلين Polytetrafluoroethylene (التفلون) من طَور بخاري، وهذا يوفّر فرصة لطلي مواد لا يمكن تغطيسها في محلول.

تتضمّن هذه السيرورة مراكمةَ طلاء البولي رباعي فلور الإيثيلين جزيئاً تلو آخر، تماماً كضم خرزات القلادة. في سلم المقاسات النانوية، تمكِّن هذه السيرورة الباحثين من تفصيل الرأس عند السطح الخارجي لتحقيق خواص إضافية غير طرد الماء.

ويمكن استخدام هذه التقنية أيضاً لطلي أشكال هندسية غير معتادة كالأسلاك الدقيقة التي لا يمكن استخدام طرائق التوضيع الأخرى (التي تتضمّن شَيّ طبقة سميكة من المسحوق) لترسيب البولي رباعي فلور الإيثيلين عليها. يمكن لهذه السيرورة أن تصل إلى مناطق غير السطح الخارجي للقطعة لتطلي فجوات داخلية كتلك التي توجد في مادة مسامية.

وقد أُثبت أن هذه التقنية توضِّع طبقة رقيقة جداً من طلاء طارد للماء يمكن استخدامه لصنع أنواع جديدة من المواد الكتيمة للماء، ويوفّر سبلاً لضم الطلاءات الكتيمة للماء إلى تلك المضادة للجراثيم وغيرها من الطلاءات النشطة. ومن تطبيقاتها المحتملة طلاءات قماش الملابس العسكرية، وطلاءات للمسابر العصبية السلكية الدقيقة، وعوازل للدارات المتكاملة.

## التوضيع المحسَّن بحزمة الشوارد

التوضيع المحسَّن بحزمة الشوارد (Ion Beam Enhanced Deposition) (IBED)، أو التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد، هو تقنية غشاء رقيق تمكِّن من توضيع أنواع مختلفة من الطلاءات البصرية والعازلة كهربائياً ونصف الناقلة والتزليقية. وتمكِّن طبيعة السيرورة من توضيع طلاءات ذات تراكيب معدنية واسعة الطيف مع درجة عالية من السيطرة على البنية النانوية. ويتحقّق التصاق الغشاء الرقيق بالركيزة من دون الحاجة إلى تسخين خارجي، ويمكن إبقاء درجات حرارة المعالجة تحت 93 مْ.

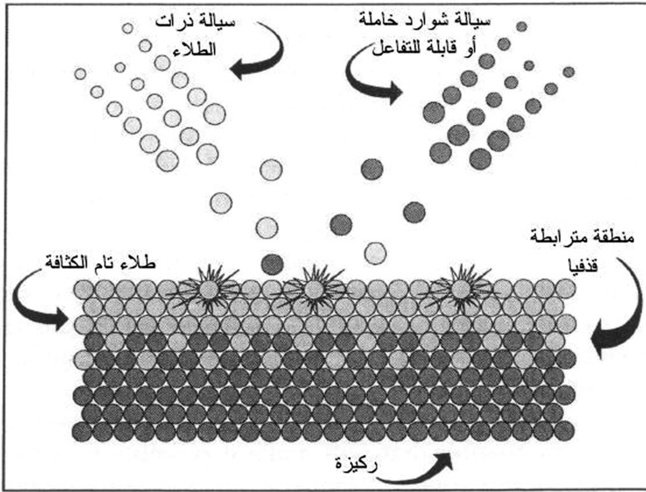
إن سمات السيرورة هذه مهمة للطلاءات البصرية ونصف الناقلة، ويمكن أن تكون ذات فوائد جمّة حين استخدامها لترسيب الطلاءات التزليقية. لكن خلافاً للطلاءات البصرية ونصف الناقلة التي تكون دائماً رقيقة (سماكتها أقل من الميكرون) وتُرسَّب في أغلب الأحيان على ركائز مسطّحة، فإن الطلاءات التزليقية يجب أن تكون أكثر سماكة (5 ـ 10 ميكرون) ويجب أن تُرسَّب على قطع ميكانيكية ثلاثية الأبعاد. لذا فإن متطلبات وتجهيزات المعالجة تختلف كلياً عن تلك المستخدمة لترسيب الطلاءات البصرية ونصف الناقلة.

وتُعتبر هذه السيرورة سيرورة فيزيائية غير متوازنة تُنفَّذ بالقصف المتزامن لغشاء في قيد النمو بحزمة جُسيْمات ذرّيّة عالية الطاقة يُتحكَّم فيها على نحو مستقل. ويتولَّد الغشاء في أثناء النمو بالتبخير في الخلاء أو بالترذيذ بحزمة الشوارد. تتألف حزمة الجُسيْمات المستقلة من ذرّات مشحونة (شوارد) منتزعة من منبع شوارد عريض الحزمة عالي الطاقة. ويمكن للحزمة أن تتكوَّن من شوارد خاملة موجبة من قبيل شوارد النيون أو الأرغون أو الكربتون، أو من شوارد نشطة موجبة كشوارد النيتروجين أو الأُكسجين.

تُجرى سيرورة التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد في جو من الخلاء الشديد عند ضغط يقل عن 0.00013 باسكال. وبالاختيار الصحيح لموسّطات التوضيع، يمكن إبقاء درجة حرارة القطعة التي في قيد المعالجة تحت 93 مْ. يري الشكل 12 ـ 16 مخططاً عاماً للسيرورة.

من أنواع الطلاءات التي رُسِّبت بهذه الطريقة طلاءات معدنية (كروم، نيكل، تيتانيوم، ألمنيوم، نحاس، فضة، بلاتين، ذهب)، ونيتريدات معدنية (TiN، $Cr_2N$، $Si_3N_4$، AlN، ZrN)، وأكاسيد ($SiO_2$، $Al_2O_3$)، وكربيدات (طلاءات شبيهة بالألماس). وسماكات

الطلاءات بين 1 و10 ميكرون ممكنة بهذه الطريقة، وهي مجدية اقتصادياً. ونظراً إلى أن بنية الطلاء النانوية شديدة التجانس، فإن الخواص الميكانيكية للطلاءات الموضَّعة بمساعدة حزمة الشوارد تفوق تلك التي للطلاءات المكافئة المشكَّلة بتوضيع الأبخرة فيزيائياً أو بالطلي الكهربائي. وتتصف هذه الطلاءات بالالتصاق والترابط الجيدين، وهي ناعمة جداً في مستوى المقاسات الكبيرة والميكرويّة، وتخلو من الفراغات والثقوب. وأهم من ذلك أن خواصها تبقى نفسها حين تكرار إنتاجها، وهذا مطلب أساسي في الإنتاج الكمي.




**الشكل 12 ـ 16: رسم توضيحي لتنفيذ سيرورة التوضيع المحسَّن بحزمة الشوارد.**

من تطبيقات الطلاء بمساعدة حزمة الشوارد طلي المكوِّنات ذات الدقة العالية وأدوات التصنيع المستخدمة في الصناعات الجوية الفضائية، وصناعة السيارات، والصناعات الطبية والصيدلانية والكيميائية، وفي صناعات النفط والغاز، وفي التجهيزات الصناعية،

وفي التبريد والإلكترونيات. وهذه الطلاءات مثالية لتطبيقات السطوح العالية الجودة الضرورية للمكوِّنات ذات الدقة العالية التي لا يمكن تحقيقها بالطلاءات وتقانات الطلاء العادية.

وتُوضَّع الطلاءات التزليقية، ومنها الـ TiN و$Cr_2N$، عادةً باستخدام واحدة من سيرورات توضيع البخار فيزيائياً ذي الانفراغ التوهّجي، ومن أمثلتها التبخير التفاعلي المفعَّل (Activated Reactive Evaporation) أو الترذيذ بالقوس المهبطية أو الترذيذ الماغنتروني. في هذه السيرورات، تنقل مكوّنات الطلاء التفاعلية وتضم معاً ضمن بلازما الانفراغ التوهّجي للغاز الحامل. وتتحرَّض التفاعلات التي تحصل بين مكوّنات الطلاء في أثناء الانفراغ التوهّجي للغاز الحامل بواسطة الطاقة العالية التي تحملها شوارد الانفراغ. لذا فإن الخواص التعدينية والبنيوية والميكانيكية للطلاء تتحدّد بالبيئة الترموديناميكية للانفراغ التوهّجي. حين غمر الانفراغ التوهّجي لمتفاعلات توضيع البخار فيزيائياً، لا يمكن التحكُّم بها كل على حدة. لذا قد يكون من الضروري استمثال خاصية من خواص الطلاء (كحجم الحُبيْبة) على حساب خواص أخرى (من قبيل الكثافة أو الالتصاق).

وتختلف سيرورة التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد عن سيرورات توضيع البخار فيزيائياً في أن مكوّنات الطلاء المتفاعلة لا تتفاعل أولاً ضمن الانفراغ التوهجي، بل ترسَل إفرادياً مباشرة إلى السطح. يُضاف إلى ذلك أن طاقة التفاعل تأتي من الطاقة الحركية المقدَّمة إلى أحد المتفاعلات. وهذا يوفّر سيطرة أكبر على سيرورة التفاعل تؤدّي إلى مرونة أشدّ في البنية النهائية للطلاء.

وتمكِّن هذه السيرورة من توضيع طلاءات تزليقية ذات أداء أفضل من أداء مكافئاتها التي توضَّع بالبخار فيزيائياً. يُظهر الجدول 12 ـ 3 الفوارق الرئيسة بين التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد وتوضيع البخار فيزيائياً.

## الجدول 12 ـ 3: مقارنةً سيرورتي الترسيب بمساعدة حزمة الشوارد وترسيب البخار الفيزيائي

| توضيع البخار فيزيائياً | التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد |
|---|---|
| **التزويد بالمتفاعلات**<br>ضمن جو من البلازما المحيطة بالقطع | متزامن مباشرة إلى سطوح القطع |
| **كيمياء التفاعل**<br>محرضة حرارياً بسخونة البلازما | محرضة حركياً بالطاقة الحركية للشوارد |
| **ضغط التفاعل**<br>**$10^{-3}$** تُرّ مع ضغوط جزئية عالية للهيدروجين وبخار الماء والأُكسجين وثاني أُكسيد الكربون | $10^{-6}$ تُرّ مع ضغوط جزئية منخفضة للهيدروجين وبخار الماء والأُكسجين وثاني أُكسيد الكربون |
| **درجة حرارة حجرة التفاعل**<br>أعلى من 400 مْ | أقل من 93 مْ |
| **بنية الطلاء**<br>بلورية مع حُبيْبات مقاساتها تساوي 1 ـ 50 ميكرون التصاق الطلاء بالتغلغل الحراري، ثمة حاجة إلى طبقة وسيطة | شبه متبلورة، مقاسات الحُبيْبات أقل من 1 ميكرون بالخلط القذفي، لا حاجة إلى طبقة وسيطة |

يُضاف إلى ذلك أنه ليست ثمة حاجة إلى مواد سامة في سيرورة التوضيع بمساعدة حزمة الشوارد، وليس ثمة نفايات تنجم عنها. لذا ليست ثمة حاجة إلى معايير تصميم خاصة بالتزام التشريعات البيئية. أما اعتبارات الأمان الكهربائي فيجب أن تأخذ في الحسبان وجود وحدة تغذّية عالية الجهد الكهربائي (يصل حتى 100 كيلو فولت جهد مستمر) لازمة لمنبع الشوارد العالية الطاقة، ووحدة تغذّية ذات تيار قوي (قدرتها 15 كيلو واط) لازمة للمبخِّر ذي المدفع الإلكتروني.

### توضيع بخار البلازما

ثمة طلاءات $Cr_2N$ نانوية البلّورات، قاسية ومتينة، وتتصف بالتصاق ممتاز طوَّرتها الشركة Phygen[27]. وتُطبَّق هذه الطلاءات على شكل غشاء رقيق بسيرورة متخصِّصة لتوضيع البخار فيزيائياً.

ونظراً إلى أن هذه الطلاءات رقيقة جداً، فإنها لا تؤثّر في الأبعاد المهمة للأدوات ومكوّنات الآلات الدقيقة المعالجة حرارياً على النحو الملائم. وهي تحقّق مقاومة أعلى للاهتراء الاحتكاكي

وتستطيع تحمُّل أحمال ميكانيكية أكبر مما هو ممكن في كثير من طلاءات توضيع البخار فيزيائياً الشائعة.

تتكوَّن هذه الطلاءات من طَور وحيد متوازن كيميائياً، $Cr_2N$، وهي تلتصق عملياً التصاقاً ممتازاً بأي مادة تُصنع منها الركيزة. وهي تتصف ببنية حُبيْبية متساوية الأطوال المحورية غير قضبانية، وببنية ميكرويّة نانوية البلّورات، مع قوة ترابط كبيرة.

تصل قساوة هذه الطلاءات من حيث مقاومة الخدش النانوي حتى 40 ـ 45 جيغا باسكال، ويساوي معامل تشوّهها المرن نحو 450 جيغا باسكال عادةً. وهي مستقرة كيميائياً وحرارياً في الهواء حتى درجة حرارة لا تقل عن 840 مْ. وهي خاملة كيميائياً وتوفّر حماية ممتازة من التآكل بسبب بنيتها الكثيفة غير القضبانية والخالية من الفراغات. وهي تتصف أيضاً بمعامل احتكاك صغير (معامل احتكاك أصغر من 0.1) ضمن ظروف ملائمة من التزليق والأكسدة.

من تطبيقات هذه الطلاءات أدوات ومكوّنات مختلفة مشغَّلة لاستخدامها في تشكيل الألمنيوم، وفي قولبة اللّدائن بالحقن، وصناعة الزجاج، والسحب العميق (Deep Drawing) وغيرها. إن مصدر القلق الرئيس في تشغيل الألمنيوم هو جعل التصاق بِرادة الألمنيوم بحواف أدوات القطع أصغرياً، وضمان إزالة جيدة لتلك البِرادة من الأداة، وضمان أن تكون الأداة قوية بما يكفي لتحمُّل قوى القطع من دون أن تنكسر.

لقد تركَّزت التطوّرات التقانية الخاصة بالطلاء في تصغير الحواف المتكوِّنة نتيجة القطع. فمن الطلاءات المناسبة لأدوات القطع الـ TiN، TiCN، TiAlN، AlTiN، $Cr_2N$، ZrN، الألماس، والطلاءات الشبيهة بالألماس. وبوجود هذا الكم من الخيارات، رغبت ورشات تفريز المكوِّنات الجوية الفضائية أن تعرف أيُّها أفضل في تطبيقات التشغيل العالي السرعة للألمنيوم.

إن استخدام توضيع البخار فيزيائياً لتوضيع الـ TiN، TiCN، TiAlN، AlTiN على أدوات القطع يجعلها غير ملائمة لتطبيقات الألمنيوم. فسيرورة الطلي هذه تولِّد سببيْن لالتصاق الألمنيوم بأداة القطع: خشونة السطح، وقابلية التفاعل الكيميائي بين الألمنيوم وطلاء الأداة.

تُعطي سيرورة توضيع البخار فيزيائياً سطحاً أخشن من سطح المادة التي يجري التوضيع عليها. وتجعل «الوديان والذرى» الناجمة عن هذه السيرورة الألمنيوم يتجمع بسرعة في تلك الوديان على سطح الأداة. يُضاف إلى ذلك أن الطلاء المطبَّق بتوضيع البخار فيزيائياً قابل للتفاعل مع الألمنيوم بسبب خصائصه البلّورية المعدنية والبلّورية الشاردية. فالطلاء TiAlN يحتوي على الألمنيوم فعلاً، وهو يلتصق بسهولة بسطح قطعة من المادة نفسها. إن خشونة السطح وقابلية التفاعل تجعلان أداة القَطْع والقطعة المشغُّلة تلتصقان معاً، وهذا ما يؤدّي إلى تكوُّن حواف القَطْع.

وقد لوحظ في اختبارات تشغيل الألمنيوم بسرعات عالية أن أداء أداة كربيدية غير مطلية خشنة الحُبيْبات كان أفضل من أداء أداة مطلية بالـ TiN، TiCr، TiAlN، AlTiN. لا يعني هذا الاختبار أن جميع طلاءات أدوات القَطْع سوف تسيء إلى أداء القِطَع. فالطلاءات الألماسية والشبيهة بالألماس تعطي سطوحا ناعمة جداً خاملة كيميائياً. وقد وُجد أن هذه الطلاءات تحسِّن كثيراً من عمر الأداة حين استخدامها في قطع الألمنيوم.

ووُجد أيضاً أن الطلاءات الألماسية هي أفضل الطلاءات أداءً، إلا أنها مكلّفة جداً. أما الطلاءات الشبيهة بالألماس فتتصف بأفضل تكلفة عند أداء معيّن، مضيفة نحو 20 ـ 25 في المئة إلى تكلفة الأداة الكلية. وتُزيد هذه الطلاءات من أعمار الأدوات بمقدار ملحوظ

مقارنةً بعمر أداة كربيدية خشنة الحُبَيْبات وغير مطلية[28]. وبيَّن كوفال[29] (Koval) أن القِطَع الحساسة للحرارة التي لا تستطيع تحمُّل كثير من التسخين تمثِّل اختباراً حاسماً للطلاءات العالية الأداء.

تتيح سيرورات توضيع البخار للمصمِّمين تطبيق طلاءات إنهاء فاعلة وأنيقة، فالسيرورة توضِّع معادن ومواد مركَّبة حرارية من قبيل الـ TiN، TiCN، TiAlN، ZrN، CrN لا يمكن توضيعها بوسائل أخرى. إن هذه الطلاءات ذات معامل الاحتكاك المنخفض تتصف بمقاومة جيدة للاهتراء والتآكل، وهي متجانسة وتعطي إنهاءات معدنية ناعمة تشابه تلك التي للذهب والنيكل والفولاذ العديم الصدأ. وتوضيع البخار ودود للبيئة أيضاً، ولا توجد فيه أي قيود بيئية أو تهشُّش هيدروجيني (Hydrogen Embrittlement) كتلك المقترنة بالطلي الكهربائي. وصنابير الماء ومتمّمات الأبواب وأجزاء السيارة الداخلية وأدوات القطع والشوَّايات والأعضاء الصناعية تبدو أفضل من حيث المظهر والأداء حين طليها بتوضيع البخار.

ينقسم توضيع البخار عموماً إلى فئتين واسعتين متنافستين أحياناً. يُستخدم توضيع البخار كيميائياً عادةً في تطبيقات درجات الحرارة العالية التي يمثّل فيها الحتّ الحراري مشكلة. لذا فإن معظم سيرورات توضيع الأبخرة كيميائياً التجارية مرشّحة لطلي المواد العالية درجة الحرارة (750 مْ)، ومنها الكربيدات القاسية. بالمقارنة، يمكن لتوضيع البخار فيزيائياً تطبيق طلاءات وظيفية وتزيينية على المواد المنخفضة درجة الحرارة، ومنها البوليمرات وخلائط الألمنيوم. وكثيراً ما يُستخدم توضيع البخار فيزيائياً لتزيين المكوّنات الميكانيكية.

ويمكن لسيرورة توضيع البخار فيزيائياً ترسيب أي معدن أو مركَّب معدني مقاوم حرارياً تقريباً. تمثِّل المركَّبات الحرارية الخيار الطبيعي عندما تكون مجموعة من الخواص من قبيل القساوة الشديدة ومقاومة التآكل الكبيرة والجوانب التزيينية جميعاً مهمة في الوقت

نفسه. إن هذه الطلاءات رقيقة جداً، وتقع سماكاتها عادة بين 50 نم و5 ميكرون. وكثير من الأغشية المصنوعة بتوضيع البخار فيزيائياً تكون متوافقة حيوياً مع الجسم البشري ولها استخدامات في الأعضاء الصناعية (انظر الجدول 12 ـ 4).

لقد جعلت التطوّرات الأخيرة التي حصلت في سيرورات توضيع البخار فيزيائياً من الممكن الطلي بتوضيع البخار عند درجات حرارة منخفضة. ويمكن للتقنية، المسماة توضيع البخار بالقوس الكهربائية المنخفض درجة الحرارة (Low Temperature Arc-Vapor Deposition)، أن توضِّع الآن طلاءات معدنية مقاومة حرارياً وطلاءات معدنية عادية عند درجة حرارة قريبة من درجة الجو المحيط. توضع القطع التي سوف تُطلى في حجرة وتُدوَّر حول مهبط يمثّل المنبع المعدني للطلاء (زركونيوم غالباً). وتُخلَّى الحجرة من الهواء، وتُطبَّق قوس كهربائية منخفضة الجهد على المنبع المعدني، فتُبخِّر القوس المعدن عند درجة حرارة المنبع التي نادراً ما ترتفع إلى ما فوق 100 مْ.

وتُشحن الحجرة بمزيج من الغازات الخاملة والقابلة للتفاعل، ومن أمثلتها الأرغون والنيتروجين، وتحيط البلازما التي تولِّدها القوس بالمنبع. وتتشرَّد ذرّات المعدن التي تبخِّرها القوس وجُزَيئات الغاز القابلة للتفاعل ضمن البلازما وتتسارع مبتعدة عن المنبع. إن البلازما التي تولِّدها القوس فريدة من حيث إنها تولِّد سيالة من الذرّات والجُزَيئات ذات الطاقة العالية والمتشرّدة بمعظمها (أكثر من 95 في المئة). وتؤدّي الطاقة العالية إلى تكوُّن طلاء قاس ملتصق بالقطعة المثبَّتة على حوامل تدور حول المنبع. ويمكن استخدام وحدة تغذّية كهربائية لتطبيق شحنة سالبة على القطعة تؤدّي إلى زيادة إضافية في طاقة الذرّات المتكاثفة.

**الجدول 12 ـ 4**: مقارنة سيرورات الطلاء المعدني[29]

| السيرورة | درجة حرارة الطلي (مْ) | الركيزة الملائمة | مادة الغشاء الشائعة | الخصائص |
|---|---|---|---|---|
| توضيع البخار فيزيائياً ترذيذ | 50 ـ 500 | فولاذ عديم الصدأ، زجاج، زنك مطلي، شبَه مطلي كهروكيميائياً، فولاذ الأدوات (غني بالكربون)، لدائن مشكّلة، كروم، سيراميكات | TiN, CrN | سيرورة تبخير غير حرارية تُنتَزع فيها ذرّات السطح فيزيائياً بالنقل العزمي. تتطلب تحكّماً دقيقاً في جميع المتغيّرات من قبيل الغازات المستخدمة. معدّلات توضيع منخفضة. توضيع موجَّه. |
| توضيع البخار فيزيائياً: توضيع بخار القوس المنخفض الحرارة | 40 ـ 180 | ألمنيوم، فولاذ مطرَّق، تيتانيوم، لدائن مطلية كهروكيميائياً وغير مطلية، زنك، شبَه، فولاذ عديم الصدأ، فولاذ الأدوات | TiN, CrN, ZrN, TiCN, TiAlN, معادن صافية أو خلائط | درجات حرارة منخفضة تمكِّن من استخدامها مع طيف واسع من الركائز، خاصة تلك التي يمكن أن تتلف بدرجات الحرارة المرتفعة. سهلة التحكُّم بها. سريعة. طلاء قطع ثلاثية الأبعاد. |
| توضيع البخار كيميائياً | 350 ـ 1500 | خلائط فائقة، فولاذ الأدوات | TiN، WC ألمنيوميد البلاتين | تخترق الثقوب والقنوات المسدودة مع طلاء متجانس. مواد الطلي غالية وخطرة. |
| توضيع البخار كيميائياً بمساعدة البلازما | من درجة حرارة الغرفة حتى 500 | لدائن حرارية، لدائن إنشائية، معادن، زجاج، سيراميكات | طلاءات شبيهة بالألماس، a-C:H:Si, TiN, TiC Ti(C,N), Zr(C,N) | متوافقة مع الركائز الحساسة للحرارة. يمكن ضبط تركيب وبنية الغشاء بسهولة. قطع ثلاثية الأبعاد. طلاءات مقاومة للتآكل، طلاءات قاسية، طلاءات بصرية، طلاءات مانعة للتغلغل، طلاءات طاقة سطحية منخفضة وعالية. |
| طلاء كهروكيميائي بالكروم القاسي | درجة حرارة غرفة مرتفعة | فولاذ مطرَّق ومصبوب | كروم | كهروكيميائية بطبيعتها، يمكن أن تعرِّض الركائز إلى التهشُّش الهيدروجيني. |

يمكن الآن طلي طيف من القطع المطرَّقة والمعالجة من دون أن يحصل فيها اعوجاج أو أن تفقد قساوتها أو توجيه حُبيْباتها. ويمكن تفصيل خواصها السطحية بحيث تكون حسنة المظهر، ومقاومة للاهتراء والتآكل، ومتوافقة حيوياً، وذات معامل احتكاك منخفض. ويمكن لقطع اللّدائن والألمنيوم والتيتانيوم والفولاذ التي تُطلى كهربائياً عادة أن تظهر الآن بالمظهر اللامع للنيكل والذهب والفضة والفولاذ العديم الصدأ. يُضاف إلى ذلك أن قطع الألمنيوم والتيتانيوم وخليطة الفولاذ الغنية بالنيكل يمكن أن تعمل من دون إزعاج. فهذه السيرورة تجعل من الممكن أن يكون لمكوِّنات كتل متعدّدة الأجزاء، مصنوعة من مواد مختلفة، الإنهاء نفسه.

## بخ بلازما البخار

لقد ثبت أن بخ بلازما البخار (Vapor Plasma Spraying) (VPS) تحت التخلية هو تقنية فاعلة لصنع مكوّنات معدنية مقاومة حرارياً لمولّدات الكهرباء البخارية القائمة على الحرارة الشمسية (Solar Thermal Engine). كانت هذه المواد حتى الآن تُصنع بتقنيات متخصِّصة تتضمّن التشغيل بالانفراغ الكهربائي (Electrical Discharge Machining) (EDM)، والتشكيل بالتدويم الانزلاقي Shear Spinning، والتلبيد تحت الضغط، وتوضيع البخار كيميائياً، والتفريز الكهروكيميائي (Electrochemical Milling) (ECM).

صحيحٌ أن هذه السيرورات فاعلة، إلا أنها مستنزفة للوقت ومكلفة. من ناحية أخرى، يمكِّن بخ البلازما تحت التخلية من تصنيع مكوِّنات معقّدة الأشكال بسهولة وبتكلفة منخفضة.

بخ بلازما البخار هو سيرورة بخ حراري تُجرى تحت ضغط منخفض في جو من غاز خامل. تولِّد بلازما حارة بجعل غاز خامل

يتدفّق عبر قوس كهربائية يولّدها جهد كهربائي مستمر. وتتدفّق البلازما عبر فوهة إلى حجرة مخلّاة تحتوي على الركيزة، حيث يُبقى الضغط عند 13 كيلو باسكال. ويُحقن مسحوق مادة الطلاء في البلازما التي تُسخِّنه وتسرِّعه باتجاه الركيزة. وتستمر العملية حتى الوصول إلى السماكة المطلوبة.

في التطبيق الحالي لهذه السيرورة، كانت الركائز المستخدمة لصنع مكوِّنات مولّدات الكهرباء من الحرارة الشمسية قضباناً من الغرافيت. يعمل القضيب بوصفه قالباً ذكراً لتشكيل داخل الطبقة الموضَّعة بالخصائص المطلوبة للحجم والشكل والإنهاء السطحي. ونظراً إلى أن الغرافيت طري وسهل التشغيل، فإنه يمكن تحقيق أشكال معقّدة وبنية سطحية دقيقة من دون صعوبة.

وبعد ترسيب المعدن المقاوم حرارياً بالسماكة المطلوبة، يُخرج القالب العمود بتفتيته بواسطة كُريَّات الأكريليك، أو أي بوليمر آخر، وهي كريَّات قاسية بقدر يكفي لحت الغرافيت من دون إيذاء المعدن المقاوم حرارياً الموضَّع. إن إزالة الغرافيت بهذه الطريقة سهلة وسريعة ومتوافقة مع القوانين البيئية.

ونظراً إلى أن داخل القطعة النهائي يتحدّد بشكل القالب العمود، الذي يجري التوضيع عليه، من حيث الشكل والحجم والإنهاء السطحي، فإنه ليس ثمة حاجة إلى تشغيل أو معالجة سطحية إضافيين للداخل. أما الأبعاد الخارجية فتتحدَّد بضبط معدّل ومدة الترسيب بحيث يكون هذا الخارج قريباً من الشكل والحجم النهائيين. ولذا تكون الحاجة إلى التشغيل الخارجي معدومة أو قليلة أيضاً. وهذا مفيد على وجه الخصوص حين صنع مكوّنات من التنغستين أو الروديوم أو الموليبدن الصعبة التشغيل بالتقنيات العادية. حتى في الحالات التي تكون فيها التسامحات أصغر مما يمكن تحقيقه ببخ

البلازما تحت التخلية، فإن مقدار التشغيل والتفريز الإضافي اللازم يكون أقل مما تقتضيه الطرائق القديمة، وهو يقتصر على سطح القطعة الخارجي فقط الذي يُعدُّ الوصول إليه أسهل من الوصول إلى السطح الداخلي. صحيحٌ أن هذه السيرورة تشترك بهذه المزايا مع سيرورات توضيع البخار تحت التخلية الأخرى (توضيع البخار فيزيائياً أو كيميائياً)، إلا أنها توضِّع المواد بمعدّلات أعلى بعدة مراتب كِبر ما تفعله تلك السيرورات.

## سيرورات البخ الحراري

في سيرورة البخ باللهب (Fame-Spraying)، يُغذَّى الأوكسجين مع وقود غازي، من قبيل الأسيتيلين أو البروبان أو البروبيلين، في مشعل لتكوين لهب. ويُحقن مسحوق أو سلك في اللهب لينصهر ويُبخ على القطعة المشغَّلة.

يحتاج البخ باللهب إلى تجهيزات قليلة جداً، ويمكن إجراؤه بسهولة في المصنع أو محلياً. وهو رخيص نسبياً ويُستخدم عموماً في تطبيقات الخلائط المعدنية. وعند سرعات جُسيْمات منخفضة نسبياً، تحقِّق سيرورة البخ باللهب أكبر تراكم من مادة معيّنة مما تراكمه أي سيرورة بخ حراري أخرى. وتؤدّي سرعات الجُسيْمات المنخفضة أيضاً إلى تكوين طلاءات أشدّ مسامية وأكسدة مقارنةً بطلاءات البخ الحراري الأخرى. يمكن للمسامات أن تكون مفيدة في الحالات التي يُستخدم الزيت فيها للتزليق، حيث يبقى مقدار معيّن من الزيت دائماً ضمن الطلاء ممدِّداً عمر الطلاء. وتزيد الأكسدة القساوة وتحسِّن مقاومة الاهتراء. وفي ما يخص التقسية السطحية بالتلبيس (Hardfacing)، تُطبَّق عادةً خلائط ذاتية السيلان بالبخ باللهب ثم

تُدمج في القطعة. تحقِّق سيرورة الدمج ترابطاً تعدينياً مع الركيزة، وقوة التصاق شديدة ما بين الجُسيْمات، ومستويات منخفضة جداً من المسامية[30][31].

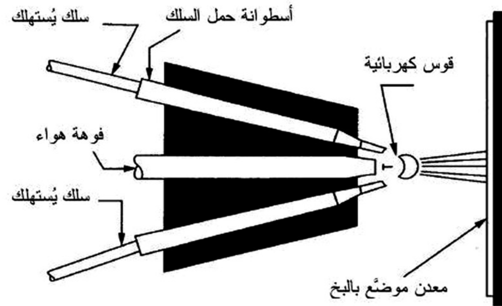
توضِّع سيرورات البخ الحراري مواد معدنية أو غير معدنية في الحالة المصهورة أو نصف المصهورة على ركيزة محضَّرة لتشكيل الطلاء. وهذا الطلاء ممتاز لإصلاح القطع المهترئة، وهو يُحسِّن التجهيزات الجديدة أو المستخدمة.

ثمة خمس سيرورات شائعة للبخ الحراري. يُستخدم في سيرورة قوس السلك (الشكل 12 ـ 17) قوساً كهربائية لصهر سلك معدني يُغذّى في المشعل باستمرار. ويُذرِّر الهواء أو غاز خامل مضغوط المعدن المصهور ويدفعه نحو الركيزة.

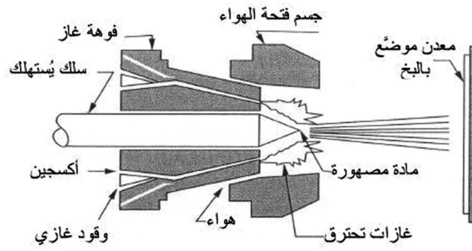
وفي سيرورة السلك واللهب (الشكل 12 ـ 18)، يُصهر سلك بشعلة تنجم عن احتراق وقود وأُكسجين. وتُذرَّر الجُسيْمات المصهورة وتُدفع إلى الركيزة بقوة احتراق الوقود الغازي والهواء المضغوط.

وفي سيرورة مسحوق البلازما (الشكل 12 ـ 19)، يُستخدم قطب من التنغستين لتكوين قوس كهربائية. ويتحوَّل غاز أو مزيج غازي ضمن القناة إلى حالة بلازمية مولِّداً حرارة شديدة جداً. وتُدفع القوس إلى خارج الفوهة حيث تُغذّى بمسحوق مادة معدنية أو غير معدنية. ويُدفع المسحوق المصهور بعدئذٍ إلى الركيزة بسرعة تساوي أو تفوق سرعة الصوت.

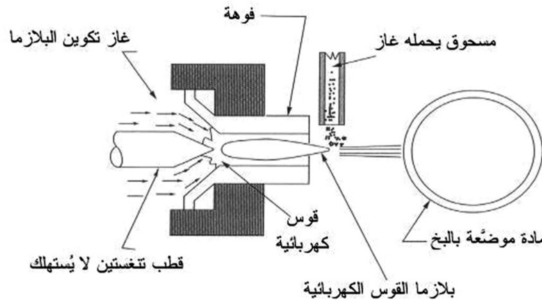
وفي سيرورة المسحوق والشعلة (الشكل 12 ـ 20)، تصهر شعلة وقود وأُكسجين مسحوقَ المادة. وتُدفع هذه المادة المنصهرة إلى الركيزة بقوة احتراق الوقود والهواء المضغوط.



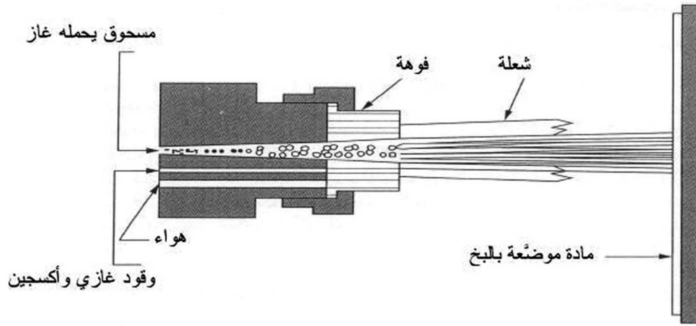
الشكل 12 ـ 17: سيرورة القوس الكهربائية ذات السلك.



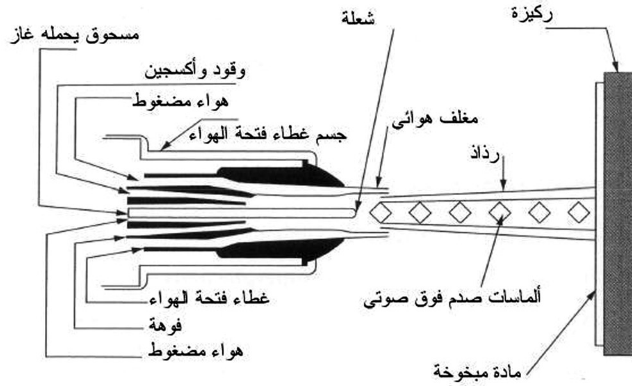
الشكل 12 ـ 18: سيرورة السلك واللهب.



الشكل 12 ـ 19: سيرورة مسحوق البلازما




**الشكل 12 ـ 20: سيرورة المسحوق والشعلة.**




**الشكل 12 ـ 21: سيرورة الأكسجين والوقود العاليَيْ السرعة.**

وفي سيرورة الوقود والأُكسجين العاليَيْ السرعة (الشكل 12 ـ 21)، يُحرق وقود غازي بالأُكسجين عند ضغط عالٍ. ويُسرَّع المزيج المحترق بواسطة فوهة متضيِّقة ذات شكل مخصَّص لهذا الغرض. وتُغذّى مساحيق معدنية أو غير معدنية في ذلك اللهب العالي السرعة حيث تُدفع إلى الركيزة صادمةً إياها لتكوِّن طلاءً كثيفاً ذا قوة التصاق شديدة.

إن هذه السيرورة هي التقنية المفضلة لبخ الكربيدات المقاومة للاهتراء، وهي ملائمة أيضاً لبخ الخلائط المقاومة للاهتراء أو التآكل، ومنها الخلائط Hastelloy، Tri-balloy وInconel. وبسبب الطاقة الحركية العالية والطاقة الحرارية المنخفضة التي تعطيها السيرورة لمواد الطلي، فإن الطلاءات الناتجة تكون شديدة الكثافة، وذات مسامية تقل عن 1 في المئة، وتتصف بقوى التصاق شديدة جداً، وبإنهاءات سطحية ناعمة تتحقّق في أثناء البخ، وبمستويات أكسدة منخفضة. وقد مكَّنت هذه الخواص من أن تُصبح الطلاءات المبخوخة بهذه السيرورة بديلاً مغرياً للتلبيس والطلي بالكروم.

## سيرورات البخ المعدني

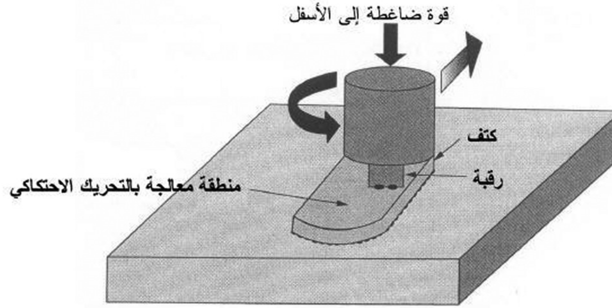
طوَّر إينوفاتي[32] بنجاح تقنية توضيع معدن منخفضة درجة الحرارة أسماها التعدين الحركي (kinetic Metallization)، وهي سيرورة تستطيع توضيع طلاءات لاصقة تامة الكثافة من معادن متنوّعة على سطوح معدنية عادية من دون تحضير السطح المُكْلِف. فالطلاءات المكوَّنة من النحاس والفولاذ العديم الصدأ والنيكل والكروم والألمنيوم والكوبالت والتيتانيوم والنيوبيوم والمعادن الأخرى والخلائط القائمة عليها ممكنة التوضيع على سطوح من قبيل الفولاذ والألمنيوم والتيتانيوم والنحاس والشبَّة. يُضاف إلى ذلك أن مساحيق اللأْم (القائمة على الفضة أو النحاس أو الألمنيوم أو النيكل) يمكن أن تُبخ على القطع التي سوف تُجمع معاً، وقد عُرِضَت أيضاً طلاءات منها على ركائز سيراميكية. والمادة التي تُستخدم في السيرورة هي المسحوق. أما تكلفة السيرورة فهي من رتبة تكلفة السيرورات المنافسة. ومن تطبيقاتها السطوح المقاومة للاهتراء أو التآكل في القطع والآلات والتجهيزات، إضافة إلى الطلاءات التزيينية[33].

ونظراً إلى أن المساحيق تُوضَّع عند درجات حرارة أخفض كثيراً من درجات حرارة انصهارها، فإن الطلاءات تتصف بحُبيْبات شديدة النعومة. يُضاف إلى ذلك أن هذه السيرورة تدرأ تشويه القطعة حرارياً في أثناء الطلي، ولا تسبّب التغلغل في ما بين طبقات الطلاءات المتعدّدة. وقد أُجري بخ لمعادن كالألمنيوم الصافي أو الـ Al-SiC بنجاح أيضاً وأعطى بنية ميكرويّة ناعمة للطلاء النهائي.

## سيرورات التحريك الاحتكاكي

### المعالجة بالتحريك الاحتكاكي لتحقيق اللّدانة الفائقة

يمكن للمعالجة بسيرورة التحريك الاحتكاكي (Friction Stir Processes) (الشكل 12 ـ 22) لتحقيق اللّدانة الفائقة أن توسّع نطاق التشكيل الفائق اللّدانة إلى عدة مفاهيم تمكينية جديدة من قبيل اللّدانة الفائقة الانتقائية، واللّدانة الفائقة السميكة الصفائح، والتطريق الفائق اللّدانة، وفقاً لما أورده ميشرا[34] (Mishra).




**الشكل 12 ـ 22: رسم يوضح سيرورة المعالجة بالتحريك الاحتكاكي حيث تمثل الأداة الدوارة الرقبة وتمثل القطعة المشغَّلة الكتف. يتركَّز التسخين المتولِّد من الاحتكاك بين الأداة والقطعة المشغَّلة موضعياً معطياً حُبيْبات شديدة النعومة.**

لقد جرى تحديد سِمَتين بنيويتين ميكرويتين مهمتين للّدانة الفائقة في خلائط الألمنيوم التجارية: حجم الحُبيْبة وأحجام الجُسيْمات المكوِّنة لها. يُعطي التحريك الاحتكاكي بنية ميكرويّة حُبيْباتها شديدة النعومة في المنطقة المُحرَّكة. وتحصل نعومة الحُبيْبات من التشوّه الشديد اللّدن المقترن بحركة المادة من أمام الرقبة الدوّارة إلى خلفها. وينجم عن ذلك بنية ميكرويّة ذات حُبيْبات شديدة النعومة على طول مسار المعالجة بالتحريك الاحتكاكي. يُظهر الجدول 12 ـ 5 بيانات حجم الحُبيْبة لخلائط ألمنيوم تجارية مختلفة بعد اللحام أو المعالجة بالتحريك الاحتكاكي. تجدر الإشارة إلى أنه تم الحصول على أقطار حُبيْبات أصغر من 10 ميكرونات فعلاً.

يُعزى تكوُّن الفجوات في خلائط الألمنيوم التجارية إلى الجُسيْمات الرئيسة المكوِّنة للمادة. يبيّن الشكل 12 ـ 23 مقارنةً بين حصول الفجوات في الخلائط المعالجة بالتحريك الاحتكاكي، وبين حصولها في الخلائط 7XXX التجارية المعالجة بالسيرورة الحرارية الميكانيكية (Thermal-Mechanical Processing) (TMP). من الواضح أن المعالجة بالتحريك الاحتكاكي تُزيد قيمة الانفعال الحرجة وتخفِّض مقدار الفجوات كثيراً.

طُوِّرت عدة مفاهيم جديدة للاستفادة من اللّدانة الفائقة التي تحقِّقها المعالجة بالتحريك الاحتكاكي، ومنها اللّدانة الفائقة الانتقائية، وتشكيل الصفائح أو الألواح السميكة، والتطريق الفائق اللّدانة:

● **اللّدانة الفائقة الانتقائية (Selective Superplasticity)**: تقوم فكرة اللّدانة الفائقة الانتقائية على مقدرتها الفريدة على التعديل الموضعي للبنية الميكرويّة. يمتلك كثير من المكوِّنات سمات تصميمية تحتاج إلى قابلية تشكيل عالية في بضع مناطق محدودة.

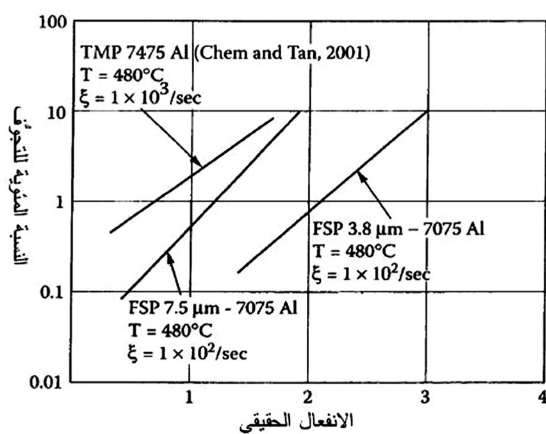
وبهذه الطريقة الانتقائية، يمكن للمصمِّمين أن يعتمدوا اللّدانة الفائقة للصفائح السميكة والألواح. من حيث الفكرة، يمكن معالجة صفيحة أو لوح، مشكَّليْن بالصبّ المتواصل (Continuous-Casting)، بالتحريك الاحتكاكي في مناطق محلية وأن تُشكَّل تشكيلاً فائق اللّدانة لتحقيق مزايا كبيرة من حيث مرونة التصميم والتكلفة.

**الجدول 12 ـ 5**: ملخص لمقاسات الحُبيْبات في منطقة نَجِّتْ (Nugget Zone) المعالجة أو الملحومة بالتحريك الاحتكاكي في خلائط الألمنيوم التجارية [34].

| المادة | سماكة الصفيحة (مم) | شكل الأداة | معدّل الدوران (دورة/ دقيقة) | سرعة الانتقال (مم/ دقيقة) | مقاس الحُبيْبة (ميكرون) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1100A1 | 6.0 | أسطواني | 400 | 60 | 4 |
| 2017A1-T6 | 3 | أسطواني محلزن | 1250 | 60 | 10 ـ 9 |
| 2024A11 | 6.35 | أسطواني محلزن | 300 ـ 200 | 25.4 | 3.9 ـ 2.0 |
| 2095A1 | 1.6 | - | 1000 | 252 ـ 126 | 1.6 |
| 2519A1-T87 | 25.4 | - | 275 | 101.6 | 12 ـ 2 |
| 5054A1 | 6.0 | - | - | - | 6 |
| 5083A1 | 6.35 | أسطواني محلزن | 400 | 25.4 | 6.0 |
| 6061A1-T6 | 6.3 | أسطواني | 1000 ـ 300 | 150 ـ 90 | 10 |
| 7010A1-T7651 | 6.35 | - | 450 ،180 | 95 | 6 ،1.7 |
| 7050A1-T651 | 6.35 | - | 350 | 15 | 4 ـ 1 |
| 7075A1-T651 | 6.35 | أسطواني محلزن | 400 ،350 | 152 ،102 | 7.5 ،3.8 |
| 7475A1 | 6.35 | - | - | - | 2.2 |

● **تشكيل الصفائح أو الألواح السميكة (Thick Sheet or Plate Forming)**: يقتصر التشكيل الفائق اللّدانة حالياً على تشكيل الصفائح المعدنية التي تقل سماكتها عن 3 مم. إلا أنه جرى عرض المعالجة بالتحريك الاحتكاكي لألواح بسماكة 25 مم، وجرى أيضاً لحام ألواح من خلائط الألمنيوم تزيد سماكاتها على 65 ملم بالتحريك الاحتكاكي باستخدام أدوات خاصة أو بإجراء تمريرات عدّة من الجانبين. إن المعالجة الحرارية الميكانيكية الشائعة لا تولِّد انفعال

معالجة كافٍ لتكوين حُبيْبات ناعمة في لوح سماكته 25 مم، أو لتجزئة الجُسيْمات بقدر ملحوظ مما كانت عليه في مرحلة الصبّ. بالمقارنة، يمكن للمعالجة بالتحريك الاحتكاكي أن تُنتِج حُبيْبات ناعمة وأن تُجزِّئ الجُسيْمات، وهذا يفتح الباب أمام إمكان تشكيل الألواح السميكة بالتحريك الاحتكاكي لمناطق مختارة.




**الشكل 12 ـ 23: مقارنة التجوُّف في أثناء التشوه الفائق اللدانة في الخلائط التجارية 7XXX. لاحظ أن الخليطة 7075 المُعالجة بالتحريك الاحتكاكي تُبدي تجوُّفاً أقل وانفعالاً حرجاً أشد من أجل بدء التجوُّف[34].**

يمكن للتحريك الاحتكاكي أيضاً أن يُنتِج بنية ميكرويّة تُفضي إلى لدانة فائقة بمعدل انفعال عالٍ في خلائط الألمنيوم التجارية. فبالتعديل البنيوي الميكروي الموضعي، يمكن اقتراح سيرورة تصنيع مكوَّنة من ثلاث مراحل: صب (بالتحريك الاحتكاكي) فائق اللّدانة وتطريق وتشكيل. يُضاف إلى ذلك أنه يمكن للتحريك الاحتكاكي، مع مفاهيم عدّة جديدة مبتكرة، أن يُعطي المصمّمين مزيداً من المزايا من حيث المرونة والتكاليف.

## اللحام بالتحريك الاحتكاكي

في سيرورة اللحام بالتحريك الاحتكاكي (Friction Stir Welding) تولَّد الحرارة بالاحتكاك بين الأداة وسطح القطعة المشغَّلة. ويحدِّد مقدار الحرارة المتولِّدة في القطعة جودة اللحام، وذاك المتولِّد في الأداة يحدِّد عمر الأداة.

وصف تشاو (Chao) وليو (Liu)[36] تجربة صُنعت فيها وصلة تقابلية (Butt Joint) باللحام بالتحريك الاحتكاكي لشريطين طويلين من خليطة الألمنيوم 6061-T6 القابلة للمعالجة الحرارية. وقد أُجريت التجربة باستخدام آلة لحام بالتحريك الاحتكاكي مزوَّدة بمُحِسَّات ونظام تحكُّم لتحقيق تحكّم عمودي بالقوة الضاغطة وتحكُّم في الإزاحة وقياس القوى العمودية والأفقية والعزوم والقدرة الكلية التي تصرفها الآلة.

ثُبِّت لوحَا الألمنيوم بإحكام بواسطة ملزمتين على طول الحافتين الخارجيتين بألواح خلفية سميكة من الفولاذ المنخفض الكربون، ثم وُضعت المجموعة على منصة آلة اللحام. وضُغطت أداة أسطوانية، مصمّمة خصيصاً لهذه العملية، ذات رقبة ناتئة من الكتف، سريعة الدوران على خط اللحام لتحقيق عملية اللحام. ثمة طريقتان مختلفتان لسيرورة اللحام: تُستخدم في إحداهما أداة دوّارة ذات رقبة مركزية طويلة، وتُستخدم في الأخرى رقبة قصيرة جداً.

وقد بيَّن برنامج اختبار مكثَّف أن اللحام بالتحريك الاحتكاكي يوفِّر إمكانات هائلة للوصل المنخفض التكلفة لهياكل الطائرات المصنوعة من الألمنيوم الخفيف الوزن للطائرات التجارية، ومنها الـ Airbus A380، وفق ما أورده ماكُوين (McKeown)[37]. وعرض الباحثون لدى فرع الشركة في ألمانيا أيضاً بيانات تُبيّن أن الخواص

الميكانيكية والتقانية للحام بالتحريك الاحتكاكي لوصل صفائح جسم الطائرة تقارب خواص المادة الأصلية.

وتسعى شركة بوينغ إلى تحقيق تشكيلات وصلات منحنية باللحام بالتحريك الاحتكاكي، وقد عرضت جدواه في باب آلية هبوط معقد. واختبرت الشركة في أثناء الطيران أيضاً مجموعة طبقات مجمَّعة انسيابية للطائرات المقاتلة.

ولتحقيق تناسق العمل، جرت أتمتة اللحام بالتحريك الاحتكاكي كلياً، إلا أن الإعداد للحام بقي حرجاً. لذا من الضروري معرفة بيانات كافية عن السيرورة بحيث يمكن تحديد موسّطاتها بدقة. والتوجُّه الآن هو نحو قياس القوة والعزم في أثناء اللحام بغية مراقبة البيانات وتحقيق التحكّم المغلق الحلقة، وخاصة في الروبوتات والآلات المتحركة التي قد لا تكون جاسئة بقدر كافٍ لتحمُّل الزعزعة نتيجة تحميلها .

## اللحام بالنبضة المغنطيسية

لقد أدّى تطوير وتنفيذ واستمثال تقانات لحام متقدمة من قبيل اللحام بالنبضة المغنطيسية (Magnetic Pulse Welding) (MPW) إلى تخفيض تكاليف التصنيع. يُستخدم في اللحام بالنبضة المغنطيسية، وهو سيرورة لحام في الحالة الصلبة، ضغط مغنطيسي لدفع المادة الرئيسة نحو المادة الهدف، مُبعِداً ملوّثات السطح ومحقِّقاً تماساً وثيقاً بين المعدنين يؤدّي إلى التحامهما. ونظراً إلى مزايا اللحام بالنبضة المغنطيسية العديدة، فإنه يُعتبر خياراً عملياً لتطبيقات متنوعة بغية تخفيض تكاليف التصنيع، وتحقيق لحام أفضل جودة، وتحسين الإنتاجية. واستخدم مهندسو اللحام النبضة المغنطيسية طوال سنين

للحام مواد متماثلة أو مختلفة. ومن تجهيزات اللحام بالنبضة المغنطيسية آلات طاقاتها 20 و90 و100 كيلو جول.

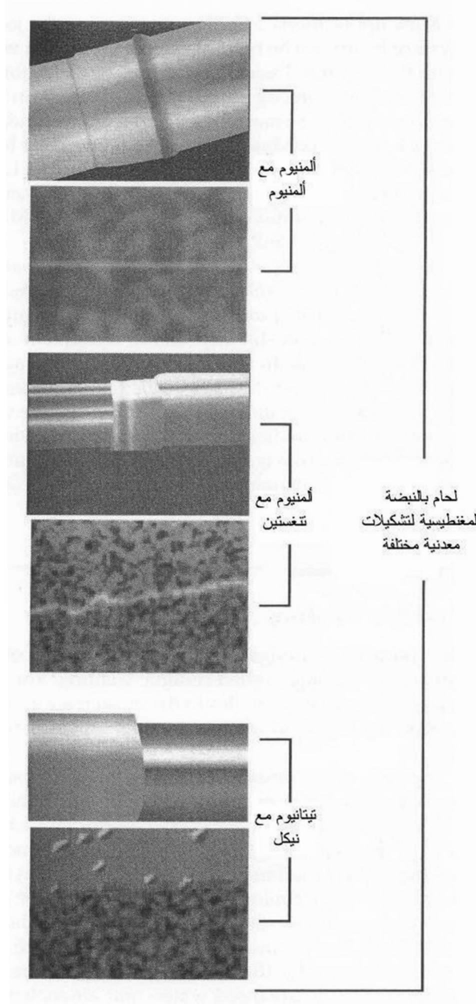
واستُخدم اللحام بالنبضة المغنطيسية لإنتاج مكوِّنات أنبوبية لخطوط الوقود. ويمكن استخدامه في تطبيقات تمتد من أنابيب ذات أقطار صغيرة تُستخدم في المحرّكات النفاثة، حتى أنابيب الألمنيوم ذات الأقطار الكبيرة الشائعة في عربات الإطلاق. ومن التطبيقات الممكنة الأخرى مجاري الهواء ومثبّتات الأنابيب ونظم التسلُّح.

يُستخدم الألمنيوم والتيتانيوم والفولاذ العديم الصدأ وخلائط النيكل غالباً في التطبيقات الجوية والفضائية. وباستخدام اللحام بالنبضة المغنطيسية تمكَّن المهندسون من القيام باللحام الناجح لخلائط ألمنيوم مع بعضها، وألمنيوم مع تنغستين، وفولاذ عديم الصدأ طراز 320 مع بعضه، وخلائط تيتانيوم مع خلائط نيكل (انظر الشكل 12 ـ 24).

يُعتبر اللحام بالنبضة المغنطيسية تقانة واعدة قادرة على تخفيض تكاليف التصنيع على نحو ملحوظ، خاصةً لوصل مكوِّنات أنبوبية في قطاع الصناعة الجوية والفضائية. صحيحٌ أن هذه التقانة مرنة وسهلة الاستخدام، إلا أن التفاعلات الكهرمغنطيسية المعقّدة التي تقوم عليها تجعل من سيرورة تصميمها تحدّياً للباحثين والمهندسين. يُضاف إلى ذلك أنها تتضمّن متغيّرات عدّة مرنة يجب تصميمها وضبطها بعناية لضمان جودة دائمة ومتانة مستمثلة لكل تطبيق.

وفرَّخ اللحامُ بالنبضة المغنطيسية تقانة النبضة الكهرمغنطيسية التي تُعدُّ حلاً فعالاً نظيفاً ومنخفض التكلفة لوصل مواد مختلفة معاً، وللتطبيقات التي لا تحتاج إلى ترابط تعديني. مقارنةً باللحام، فإن تجهيزات هذه التقانة، أي القمط التجعيدي (Crimping)، أشدّ متانةً

وأقل تكلفة وأصغر حجماً. تُستخدم في القمط التجعيد الإنشائي أخاديد وأثلام وحزوز وأسنان لتحقيق قيَم متانة تضاهي تلك التي للمادة الأصلية.




**الشكل 12 ـ 24**

القمط التجعيدي هو تقانة وصل يولِّد فيها تشوّه القطعة اللّدن تشابكاً ميكانيكياً. وتُستخدم في هذه التقانة تيارات كهربائية ذات تردّدات عالية لتوليد نبضة ضغط مغنطيسي شديد (نحو 290 ميغا باسكال) مدتها قصيرة (10 ـ 20 مكروثانية) لتشويه القطعة تشويها لدِناً.

تتركَّز معظم تطبيقات القمط التجعيدي بالنبضة الكهرمغنطيسية في وصل أنبوب مع عمود ذي أشكال سطحية. يُسرَّع الأنبوب حتى سرعات كبيرة قبل التماس مع العمود، فثمة ثلاث مزايا رئيسة للقمط التجعيدي بسرعات كبيرة. **أولاً**، يمكن لقطعتين تدوران بسرعة كبيرة أن تنطبقا على بعضهما بسهولة لتكوين رابط بينهما في السلَّم الميكروي. **ثانياً**، يُنتِج القمط التجعيدي العالي السرعة دائماً تراكباً تداخلياً طبيعياً، أو حالة من الإجهاد المتبقّي الذي يُمسك بالقطعتين معاً. وأخيراً، ثمة فرصة هنا لاستخدام الأثلام والخدوش السطحية لمسك القطعتين معاً على نحو مشابه لعمل المثبّتات المحزَّزة. وفي القمط التجعيدي بالنبضة الكهرومغنطيسية عادةً مكثّفة تتسع لـ 16 كيلو جول، مع وشيعة وحيدة اللفة.

تُعدُّ تقانة القمط التجعيدي بالنبضة الكهرمغنطيسية تقانة واعدة يمكن أن تحل محل التجميع بالبراشيم واللحام وسيرورات الوصل الميكانيكية الشائعة. ويمكن لهذه التقانة أن تخفِّض تكاليف التصنيع وأن ترفع وثوقية المنتَج، وأن تُبسِّط تجهيزات الوصل. لكن مع أنها مرنة، فإن التفاعلات الكهرمغنطيسية المعقّدة، التي تقوم السيرورة عليها، تجعل تصميمها صعباً. يُضاف إلى ذلك أن المعلومات العلمية الهندسية بخصوص تصميم وصلة بالقمط التجعيدي بالنبضة الكهرومغنطيسية والتوقّع بخصائصها قليلة جداً. لذا فإن امتلاك أدوات نمذجة (محاكاة كهرومغنطيسية وميكانيكية) ضروري لتوسيع هذه التقانة لتشمل تطبيقات مختلفة.

## لحام السيراميك

يجري إصلاح البطائن الحرارية لأفران الزجاج غالباً باستخدام تقنية متقدمة تسمّى لحام السيراميك. تُدخِل هذه التقنية جُسيْمات حرارية مسحوقة غنية بالأُكسجين في البطانة الحرارية الساخنة حيث تتأكسد المعادن وتندمج بتفاعل يولِّد حرارة شديدة تصل إلى 1600 ـ 2200 مْ.

يصهر الاحتراق العالي الحرارة سطوح كل من الجُسيْمات والبطانة مُنتِجاً رابطاً متيناً. إن المزية الأساسية للحام السيراميك هي أنه يُجرى في الأغلب حينما تكون درجة حرارة الفرن أو الوعاء قريبة من درجة حرارة عمله. أي ليست ثمة حاجة إلى إيقاف الفرن وتبريده لإصلاحه، ولذا تكون مدة التوقف عن الإنتاج أصغرية أو معدومة. وبكشف المشاكل باكراً، يمكن لهذه التقنية تمديد عمر الفرن وإلغاء تكاليف الإصلاح وإعادة التبطين التي يمكن أن تكون أحياناً باهظة.

تستخدم شركة FuseTech(38) طريقة متقدمة للحام السيراميك تتضمّن فحص البطانة الحرارية قبل وأثناء وبعد اللحام بواسطة نظام مراقبة متطوّر، يُبرَّد بالماء والهواء، ويتكوَّن من دارة تلفزية مغلقة. ويستطيع هذا النظام تحمُّل درجات حرارة تصل حتى 1925 مْ في أثناء اختراقه اللهب ضمن الفرن. وقد استُخدم نظام الدارة التلفزيونية المغلقة هذا بنجاح بوصفه جزءاً من سيرورة اللحام السيراميكي طوال ثلاث سنوات.

صُمِّمت هذه السيرورة أصلاً لإصلاح أفران الزجاج في الميدان. فقد ظهرت التقانة في الولايات المتحدة في عام 1975 بوصفها طريقة لإصلاح جدران أفران فحم الكوك في مصانع الفولاذ، لكنها تُستخدم

الآن في جميع أفران الزجاج والألمنيوم والنحاس والإسمنت والكوك.

تُستخدم في الجيل الجديد من الدارة التلفزيونية المغلقة، المصمَّم ليتحمَّل من دون أن يتلف جميع الظروف القاسية ضمن الأفران والمراجل، عدسةٌ من الكوارتز تستطيع العمل عند درجات حرارة تصل حتى 1925 مْ. تُدخَل هذه العدسة، المتوضعة في رأس منظار ما وراء الأفق (المِئْفاق) (Periscope)، في الفرن لتحقيق رؤية أمثلية. وهي تلتقط صوراً ملوّنة واضحة للبطانة الحرارية وللاحتراق عند فوهة الحرَّاق، ولأشياء أخرى. ويقوم نظام أمان لترشيح الهواء بإبعاد الهباب والبخار والزيت والجُسيْمات البالغة الضآلة، التي تزيد مقاساتها على 0.03 ميكرون، من الهواء المضغوط الذي ينظِّف ويبرِّد العدسة[38][39].

## وصل السيراميك

جرى تطوير تقانة لوصل السيراميك (Ceramic Joining) فاعلة ومقبولة التكاليف في مركز بحوث لويس لدى وكالة الفضاء الأميركية بغية وصل سيراميكات قائمة على كربيد السليكون ومواد مركَّبة مقوَّاة بالألياف[40]. تُنتِج هذه السيرورة وصلات تحتفظ بقوتها الميكانيكية عند درجات حرارة تصل حتى 1350 مْ في الهواء. ويمكن استخدامها لوصل مكوِّنات كبيرة ومعقّدة الأشكال، ويمكن أيضاً تفصيل تركيب وسماكة الوصلات وفق الحاجة. ويمكن أيضاً تكييف هذه التقانة لإصلاح المكوِّنات السيراميكية والمواد المركَّبة في الميدان.

تُستخدم السيراميكات القائمة على كربيد السليكون، والمواد المركَّبة المقوَّاة بالألياف، فعلاً في الصناعات الجوية والفضائية والنووية، وفي توليد الطاقة، وفي صناعة الإلكترونيات والنقل، وفي

طيف واسع من التطبيقات العالية درجة الحرارة، أو أنها في قيد النظر في استخدامها في تلك التطبيقات، ومنها مكوِّنات المحرّكات، وأنابيب المسخِّنات المشعّة، والمبادلات الحرارية، والمعوِّضات الحرارية، وعنفات توليد الطاقة الثابتة. ومن المنتجات الأخرى مكوِّنات الجدار الأول والبطانة في المفاعلات الاندماجية، وبطائن وقرميدات الأفران، وفي صناعة الإلكترونيات الميكرويّة.

في جميع تلك الحالات، غالباً ما تحتاج التصاميم الهندسية إلى عمليات تصنيع عالية التكاليف. وغالباً ما يكون أجدى اقتصادياً بناءُ الأشكال المعقّدة بوصل قطع ذات أشكال بسيطة. لذا فإن تقانة الوصل تمثِّل مفتاح الاستخدام الناجح للسيراميكات القائمة على كربيد السليكون والمواد المركَّبة المقوَّاة بالألياف في مكوِّنات النظم العالية درجة الحرارة. طبعاً، على الوصلات أن تحتفظ بسلامتها البنيوية عند درجات الحرارة العالية، وأن تتصف بقوة ميكانيكية جيدة وباستقرار بيئي مماثلين لقوة واستقرار المواد الأصلية. ويجب أن تكون تقنية الوصل فاعلة وعملية وموثوقة. وفي تطبيقات الإلكترونيات، يمكن لتركيب الوصلة أن يكون حاسماً.

تتضمّن معظم تقنيات الوصل الحالية وصل سيراميكات كتلية ومواد مركَّبة مقوَّاة بالألياف (سيراميكية ومعدنية) باستخدام الربط التغلغلي، واللأْم المعدني، واللأْم بالأكاسيد والأوكسينيتريدات، واللحام التغلغلي. ويحتاج بعض هذه التقنيات إلى درجة حرارة عالية للمعالجة أو الكبس الحار. وفي حالات أخرى، تكون درجة حرارة عمل الوصلة أخفض من درجة الحرارة التي تتحمَّلها المادة السيراميكية الأساسية أو المركَّبة. إلا أن الوصلات التي تُنفَّذ بتقنيات اللأْم يمكن أن تتصف بمُعَامل تمدّد حراري مختلف عن ذاك الذي للمادة الأم. وهذا الاختلاف يمكن أن يؤدّي إلى تركُّز الإجهاد في

منطقة الوصلة. لذا فإن درجة حرارة عمل الوصلات المنفَّذة باللأْم تكون عادة نحو 700 مْ.

تُعتبر السيرورة التي طوَّرها مركز بحوث لويس لدى وكالة الفضاء الأميركية طريقة تشكيل تفاعلية، وهي فريدة من حيث إنها تُنتِج وصلات ذات بنية ميكرويّة قابلة للتفصيل وفق الحاجة. وعلى وجه الخصوص، تُفصَّل الخواص الحرارية الميكانيكية لطبقات الوصلة الداخلية لتتوافق مع تلك التي للمادة القائمة على كربيد السليكون القاعدية. ومن المزايا الأخرى لهذه الطريقة أنها لا تحتاج إلى مثبّتات تتحمل درجات الحرارة العالية لتُمسك بالقطع عند درجة حرارة التسريب.




**الشكل 12 ـ 25: رسم يوضح السيرورة** ARCJoinT **لوصل سيراميكات قائمة على كربيد السليكون ومواد مركَّبة مقوّاة بالألياف**[40].

تبدأ هذه الطريقة بوضع مزيج كربوني في مناطق الوصل وفق المبين في الشكل 12 ـ 25. وتُستخدم مثبّتات للإمساك بالقطع ويُصلَّد

المزيج عند درجة حرارة بين 110 و120 مْ مدة 10 ـ 20 دقيقة. في هذه الخطوة تتماسك القطع معاً. ويوضع بعدئذٍ سليكون أو خليطة سليكون على شكل شريط أو لصاقة أو طين حول منطقة الوصلة. وتُسخَّن بعدئذٍ المجموعة مدة 10 ـ 15 دقيقة حتى درجة حرارة تقع بين 1250 و1425 مْ اعتماداً على نوع المادة المسرَّبة. فيتفاعل السليكون، أو خليطة السليكون والمعدن الحراري مع الكربون لتكوين سليكون مع مقدار محدّد من الكربون أو الأطوار الأخرى وفق ما هو محدَّد بتركيب الخليطة. وتُضبط سماكة الوصلة بضبط خواص المزيج الكربوني وقوة التثبيت المطبَّقة.

لقد وصل باحثو مركز بحوث لويس أنواعاً مختلفة من السيراميكات القائمة على كربيد السليكون والمواد المركَّبة المقوَّاة بالألياف، لها أحجام وأشكال مختلفة، ومنها مكوِّنات أنبوبية. ومن تلك المكوِّنات كربيد السليكون التفاعلي الترابط من الطراز Cerastar[41]، وكربيد سليكون ألفا الملبَّد من الطراز Hexoloy، ومواد مركَّبة مختلفة أخرى ذات حاضنة من كربيد السليكون مقوَّاة بألياف الكربون أو ألياف كربيد السليكون (C/SiC, SiC/SiC). وبعد الوصل، جرى تحديد خصائص البنية الميكرويّة والخواص الميكانيكية للوصلات عند درجات حرارة مختلفة. يمكن بهذه الطريقة صنع وصلات بالتشكيل التفاعلي بسماكات مختلفة. إن سماكة الوصلة وتركيبها يؤثِّران بقوة في خواص المواد الموصولة عند درجات الحرارة العالية والمنخفضة.

وتزداد مقاومة الحَنِي في القضبان قبل وبعد وصلها عند درجات الحرارة العالية. وأحد تفسيرات ذلك هو التئام عيوب التشغيل. إن مقاومة الحَنِي في القضبان الموصولة تماثل تلك التي للقضبان حين ورودها للمعالجة. ويبدو أن أصل التصدّع هو عدم التجانس ضمن المادة الأصلية.

كانت مقاومة الحَنِي في عيّنات كربيد سليكون ألفا الملبَّد Hexoloy عند سماكة وصلة تساوي 45 ـ 50 ميكرون 13±275، 17±302، 15± 297 ميغا باسكال. في هذه المواد، يبتدئ الكسر في مناطق الوصلات، وقد شوهد عدم تجانس في توزّع السليكون في بعض أجزاء الوصلة[45][42].

## اللواصق

ما هي أنواع اللواصق، وأين تُستخدم؟ إن معرفة أنواع اللواصق الأساسية الثمانية يساعد على تحديد استخداماتها المحتملة بسرعة.

يمكن العثور على المئات من لواصق التجميع المختلفة في المصانع اليوم. لكن معظمها يقع ضمن واحدة من ثماني فئات أساسية: اللاهوائيات، وسيانوأكريلات، وأكريليكات وسيانوأكريلات ضوئية الإنضاج (المنضّجة ضوئياً)، وصُهارات ساخنة، واليوريتان التفاعلي، والإيبوكسيات، والبولي يوريتانات، والأكريليكات المكوَّنة من جزأين.

تتكوَّن اللواصق اللاهوائية من جزء واحد، وهي تبقى سائلة في الهواء، وتتصلَّد لتصبح مادة متينة حرارية التصليد حين وضعها بين ركيزتين معدنيتين. تُستخدم اللواصق اللاهوائية عادة لسد وإحكام سد شقوق التجميع، وتثبيت المحامل والتوابع على المحاور أو العلب، وإحكام سد الشفاه المعدنية بدلاً من موانع التسرّب المنفصلة. ويمكن للواصق اللاهوائية تحسين طرائق الوصل الميكانيكية، وفي بعض الأحيان الحلول محلها، مخفِّضة تكاليف التصنيع ومطيلةً عمر التجهيزات.

ولواصق السيانوأكريلات هي لواصق ذات مقاومة شدّ كبيرة،

وهي تتكوَّن من جزء واحد، وتُستخدم للصق اللّدائن والمعادن والمطّاط. تتصلَّد هذه اللواصق بسرعة عند درجة حرارة الغرفة لتكوِّن راتنجاً حراريّ التلدُّن حين وضعها بين ركيزتين بوجود رطوبة سطحية ميكرويّة. يبدأ التصلُّد عند سطح الركيزة، أما الفجوات التي يحصل التصلُّد فيها فهي أصغر من 0.0254 سم.

تنشأ قوة التثبيت في هذه اللواصق خلال ثوان، وتحصل قوة التثبيت التامة خلال 24 ساعة، وهذا ما يجعلها ملائمة للإنتاج الكمّي المؤتمت. وبوضع طبقة رقيقة تحضيرية للبولي أوليفين على الركيزة قبل التجميع، تلتصق لواصق السيانوأكريلات التصاقاً أفضل باللّدائن الصعبة اللصق، ومن أمثلتها البولي بروبيلين والبولي إيثيلين، في حين أن المسرِّعات تساعدها على التصلُّد بسرعة في حالة الرطوبة المنخفضة. وتُسرِّع السيانوأكريلاتات المسمّاة بـ «غير الحساسة سطحياً» أيضاً التصلُّد في حالة الرطوبة المنخفضة والسطوح الحمضية. وثمة نوع خاص منخفض تكاثف اللاصق المتبخّر على القطعة يقلِّل من الابيضاض والتحوير حول خطوط اللصق.

لم يُنظر إلى لواصق السيانوأكريلات الأولى على أنها تمتلك قوة التصاق ومقاومة كيميائية جيدتين، ولم تكن تعمل عند درجات حرارة تزيد على 83 مْ. لكن الصيغ الجديدة منها، أي تلك المقوَّاة بالمطّاط، تتصف بمقاومة أفضل للتقشُّر والصدم. وتتحمَّل الأنواع الحديثة منها المقاوِمة للحرارة العمل المستمر عند درجة حرارة تساوي 121 مْ.

والأكريليكات الضوئية الإنضاج (المنضَّجة ضوئياً) تتكوَّن من جزء واحد، وهي سائلة وخالية من المذيبات، وتتحوَّل إلى راتنجات حرارية التلدّن خلال 2 ـ 60 ثانية حين تعريضها إلى ضوء له طول الموجة والشدة الملائمتين. ويمكن لعمق التصلُّد أن يتجاوز 1.27

سم. إن طريقة التصليد وفق الرغبة هذه تتيح توضيع وإعادة توضيع القطع قبل التصلُّد. ويُستخدم في بعض أنواعها الهجينة آلية تصليد ثانوية من قبيل المفعِّلات الحرارية أو الكيميائية لإتمام عملية التصليد في المناطق الظليلة. وعلى غرار لواصق السيانوأكريلات، تأتي الأكريليكات الضوئية التصليد على شكل سوائل متدرِّجة من مخفَّفة (بلزوجة تساوي نحو 50 سانتيبواز) حتى هلامية تتميَّع بالرج (تيكسوتروبية) (thixotropic). وتتحوَّل اللواصق المصلَّدة، بناءً على صيغتها، إلى حالة تقع بين المطّاطيات الطرية واللّدائن الزجاجية التي تبقى صافية جميلة. وتلتصق الأكريليكات الضوئية الإنضاج جيداً مع ركائز مختلفة وتتحمَّل العوامل الكيميائية والحرارة المرتفعة والظروف البيئية القاسية الأخرى.

ولواصق السيانوأكريلات الضوئية الإنضاج هي صيغ جديدة تضم مزايا السيانوأكريلات والأكريليكات الضوئية الإنضاج مع تجاوز كثير من محدوديات كل منهما. يتصلَّد هذا اللاصق فوراً تقريباً حين تعرُّضه إلى الضوء الملائم ويصل إلى 60 في المئة من قوته النهائية بعد 5 ثوان فقط من التعريض للضوء. ويتصلَّد اللاصق المتبقّي في المناطق الظليلة بآلية جفاف الرطوبة المتبقّية الطبيعية، وهذا ما يلغي الحاجة إلى مسرِّعات أو مفعِّلات تجفيف أخرى. ويمكن لهذه اللواصق أن تلصق أيضاً قطعاً متراكبة غير شفافة.

لا تولِّد هذه اللّواصق إلا الحد الأدنى من الأبخرة، وهي غير حساسة لحالة سطح الركيزة. وهي تخفِّض تصدُّعات الإجهاد في الركائز الحساسة للتصدُّع المصنوعة من البولي كربونات والأكريليك، وتلصق لدائنَ البولي أوليفين حين استخدامها مع معزِّزات لصق خاصة، مركَّبة ضمن القطع المقولبة، أو مطبقة على سطوح القطع قبل اللَّصق. وقد تسارع استخدام هذه اللّواصق في الإنتاج الكمي

للتجهيزات الطبية وتعليب مواد التجميل والمجاهير الصوتية والوحدات الإلكترونية المجمَّعة وقطع اللّدائن الصغيرة.

واستُخدمت لواصق الصُهارة الساخنة عشرات السنين لتجميع منتجات صناعية واستهلاكية. تُسخَّن الصُهارات العادية (وهي راتنجات حرارية التلدّن عادةً) كي تنساب على سطح الالتصاق. أما لواصق الصُهارة الساخنة، فتملأ فجوات أكبر وتكوِّن قوى التصاق أشدّ حين تبريدها. تتضمّن الأنواع العالية الجودة من هذه اللواصق الإيثيل ـ أستات الفينيل، والبولي إيميد، والبولي أوليفين، واليوريتان التفاعلي. تُستخدم الإيثيل ـ أستات الفينيل عادة في تطبيقات الحشوات المنخفضة التكلفة. أما البولي إيميدات فتُستخدم عوضاً عن الإيثيل ـ أستات الفينيل في الظروف البيئية والحرارية القاسية. وتلتصق البولي أوليفينات جيداً بركائز البولي بروبيلين وتقاوم الرطوبة والمذيبات القطبية (Polar Solvent) والأحماض والأسس والكحولات.

وتمثِّل لواصق اليوريتان التفاعلية أحدث ما في تقانة الصُهارة الساخنة. وخلافاً لراتنجات الصُهارة الساخنة الحرارية التلدّن المعتادة التي يمكن إعادة تسخينها مرات متكررة، فإن هذه اللواصق تكوِّن راتنجات حرارية التصلُّد حين معالجتها كلياً عند نحو 121 مْ، أي عند درجة تقل بنحو 93 مْ عن درجات حرارة الصهارات الساخنة الأخرى. وتنمو قوة التصاقها الأولية ببطء نسبياً مقارنةً بالصُهارات العادية الساخنة الحرارية التلدُّن، إلا أن هذه اللواصق تعتبر السبَّاقة في اللصق الإنشائي ولصق اللّدائن الصعبة اللصق عموماً.

أما الإيبوكسيات فهي لواصق إنشائية وحيدة أو ثنائية الأجزاء تلتصق جيداً بركائز مختلفة، وهي لا تُصدِر أي نواتج ثانوية، وتملأ فراغات وفجوات كبيرة، ويكون تقلُّصها أصغرياً حين تصلُّدها. تتصف الإيبوكسيات المتصلِّدة عادة بقوة التصاق ممتازة، ومقاومة

كيميائية استثنائية، ومقاومة حرارية جيدة. أما عيبها الرئيس فهو مدة تصلُّدها الطويلة مقارنةً باللّواصق الأخرى، فهي تقع عادة بين 15 دقيقة وساعتين. تساعد الحرارة على تسريع تصلّد هذه اللّواصق، إلا أن بعض الركائز اللّدائنية تحدّ من درجة الحرارة التي يمكن العمل عندها.

وتتصف لواصق البولي يوريتان بمرونة أشد، ومقاومة تقشُّر أفضل، وبمعامل مرونة أخفض من تلك التي للإيبوكسيات. تتألف هذه اللّواصق الأحادية أو الثنائية الأجزاء من نواة طرية لتحقيق مرونة الوصل، وقشرة صلبة لتحقيق قوة الربط والمقاومة الحرارية والكيميائية. وبتغيير نسبة مناطق الانتقال من الطراوة إلى الصلابة، يمكن الحصول على طيف من الخواص الفيزيائية. فهي، على غرار الإيبوكسيات، تعمل مع ركائز متنوعة، مع أن ثمة حاجة أحياناً إلى وسيط لتحضير السطوح. فهذه اللّواصق يجب أن تُطبَّق على سطوح جافة لأن الرطوبة يمكن أن تُفسد قوة الالتصاق والمظهر الخارجي. أما مدة جفافها فهي مماثلة لتلك التي للإيبوكسي (15 دقيقة حتى ساعتين)، لذا غالباً ما تكون ثمة حاجة إلى حوامل لحمل القطع في أثناء جفاف اللاصق. تقاوم لواصق البولي يوريتان المواد الكيميائية ودرجات الحرارة المرتفعة، لكن التعرُّض الطويل لدرجات الحرارة العالية يُدنِّي خصائصها على نحو أسرع مقارنةً بالإيبوكسيات.

وتملأ الأكريليكات الثنائية الأجزاء الفجوات بسهولة، وتتحمَّل الحرارة المرتفعة والعوامل البيئية، على غرار الإيبوكسيات والبولي يوريتانات. إلا أنه يمكن تركيب صيغة لها تجف على نحو أسرع، وتحقِّق التصاقاً أفضل بالركائز الصعبة اللّصق مقارنةً بما تُحقِّقه تلك اللّواصق. وهي تبقى شديدة المرونة، وهذا ما يجعلها تقاوم التعب الطويل الأجل.

والنتيجة هي أن معظم إخفاقات الوصل باللّصق لا تحصل بسبب الافتقار إلى قوة اللّصق. فالأرجح هو أن الإخفاقات تنجم عن عوامل منها سوء التصميم، وتحضير السطوح السيئ، وظروف التشغيل غير الملائمة، أو ببساطة استخدام اللاصق غير الملائم للتطبيق. يجب دائماً اختبار التصميم قبل البدء بالإنتاج.

ثمة تقانة لصق جرى تطويرها توصَل البوليمرات فيها بتغلغل المونومرات اللاصقة في سلاسل البوليمرات الحرارية التلدّن، وما يتبع ذلك من تشابك بينها في أثناء التصليد المنخفض درجة الحرارة. تسمّى هذه السيرورة المنخفضة درجة الحرارة والضغط الالتصاق المحسَّن بالتغلغل (Diffusion Enhanced Adhesion)، وهي تمكِّن من تقليص تكاليف أدوات الإنتاج والتجميع، وتلغي الحاجة إلى المعالجة الأولية، وتحقِّق عمليا مدد تخزين طويلة جداً.

وقد بيَّن الباحثون أن لصق الراتنجات الحرارية التصليد على الراتنجات الحرارية التلدُّن يمكن أن يُحسَّن كثيراً باختيار موسّطات السيرورة واللّواصق التي تسهِّل التغلغل عبر الملتقيات. وفي حالة المواد المركَّبة الحرارية التصلُّد، التي هي من قبيل الإيبوكسيات التي لا تنصهر، يُضاف بوليمر لا متبلور حراريّ التلدّن إلى الحاضنة في أثناء التصنيع، فيُعطي خواص سطحية يمكن أن تؤدّي في المستقبل إلى ربط اندماجي أو التصاقي مع حد أدنى من تحضير السطوح.

إن الالتصاق المحسَّن بالتغلغل مفيد في وصل مواد متنوعة، ومنها المواد الحرارية التلدّن مع بعضها، والمواد المركَّبة الحرارية التصليد مع تلك الحرارية التلدّن، وأي منهما مع المعادن. على سبيل المثال، استُخدمت هذه التقنية بنجاح في برنامج الجيش الأميركي الخاص بالعربات المدرَّعة بالمواد المركَّبة[45].

## الوصل بالأسلاك

تُستخدم في معظم علب أنصاف النواقل أسلاك ذهبية ناعمة جداً لصنع توصيلات كهربائية بين رقاقة نصف الناقل وأرجل الدارة المتكاملة[46]. يبلغ طول السلك عادة 2 مم، ويساوي قطره 25 ميكرون، أي إن وزنه لا يزيد على 20 نانو غرام من الذهب. إلا أن بعض الدارات المتكاملة يمكن أن يحتوي على 200 وصلة سلكية، ويُقدَّر أن نحو 000 180 مليون دارة متكاملة قد صُنعت في عام 2003[47]. وهذا يعني أنه قد جرى استخدام مقدار كبير من الذهب، وسوف يتزايد هذا المقدار مع صنع المزيد من الدارات المتكاملة. وتقدِّر شركة استطلاعات الذهب (Gold Fields Mineral Services) أن استخدام الذهب في الدارات المتكاملة قد تضاعف منذ عام 1994 ليصبح 125 طناً في عام 2003، وأن الحاجة إليه سوف تتزايد على المدى الطويل لتلبية احتياجات الإلكترونيات الاستهلاكية[48].

تُلحَم الأسلاك بالطريقة الحرارية الصوتية التي تستخدم الطاقتين الحرارية وفوق الصوتية، أو فوق الصوتية فقط من دون الحرارية. أما التسخين فنادراً ما يُستخدم وحده، لأنه بطيء نسبياً. وأما استخدام الذهب فيعود إلى عدة أسباب. يمكن لحام الذهب بالطريقة الحرارية فوق الصوتية بوثوقية كبيرة جداً، وهذا ضروري لأن الإنتاج الكمي يتضمّن صنع ملايين الدارات المتكاملة التي يحتوي كل منها على أكثر من 100 رجل. ولا يرغب المصنِّعون في إجراء اختبارات مكْلِفة لكل دارة على حدة، ولذا يعتمدون على مقدرتهم على تحقيق إنتاجية عالية جداً لدارات متكاملة جيدة. ومزية الذهب الأخرى هي أنه يمكن تحقيق اللحام الكروي (Ball Bond) بمعدل 20 لحاماً في الثانية. يمكن استخدام الألمنيوم أيضاً بدلاً من الذهب (ولحمه

بالأمواج فوق الصوتية)، لكنه لا يمكن أن يُلحم بالطريقة الكروية، ولذا يجب استخدام اللحام الوتدي (Wedge Bonding) الذي يحتل حيّزاً أكبر من الحيّز الذي يحتله اللحام الكروي، والذي يمكن إجراؤه بمعدل 8 لحامات فقط في الثانية. والذهب لا يتأكسد أو يتآكل، ولذا لا ضرورة لإحكام إغلاق العلب.

وثمة نمو سريع في استخدام تجهيزات النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة في طيف واسع من التطبيقات[49]. ومن تلك التطبيقات مُحِسَّات التصادم في السيارات، والبدّالات الضوئية لاتصالات الإنترنت، ومُحِسَّات الضغط للسيارات والتطبيقات الطبية. ويُتوقع أن ينمو استخدامها في الهواتف الخلوية بسرعة مع ظهور البدّالات القائمة على النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة وغيرها. ومعظم البدّالات الضوئية تُطلى بغشاء رقيق من الذهب باستخدام تقنيات التخلية، لصنع سطوح مرايا عاكسة. ومعظم البدّالات التي تُصنع من النظم الكهروميكانيكية الميكرويّة تعمل بقوة تماس منخفضة جداً، ولذا لا يمكن استخدام سوى الذهب للحصول على مقاومة تماس كهربائي منخفضة.

## النتردة والكربدة

النتردة والكربدة (Nitrocarburizing) في حمّام ملحي هي سيرورة حرارية كيميائية لتحسين خواص المعادن الحديدية. إلا أن بعض الأدوات والفولاذات العالية الخلط عُرضة إلى انخفاض في قساوتها اللبية (Core Hardness) بعد عملية النتردة والكربدة. ولدرء مثل هذا النقصان، جرى تطوير سيرورة حمّام ملحي منخفضة درجة الحرارة. فالمعالجة عند درجات حرارة منخفضة لا تزيد على 480 مْ،

لا تحتفظ هذه السيرورة بالصلابة اللبية فقط، بل يمكنها أحياناً زيادتها.

يُضاف إلى ذلك أن التطوّرات الأخيرة جعلت النتردة والكربدة بالحمّام الملحي ودودة للبيئة. تتضمّن هذه السيرورة الحديثة استخدام أملاح غير سيانيدية، وحمّاماً قابلاً لإعادة الاستعمال كلياً (لا تُنتِج نفايات ملحية)، ومُدَد معالجة بين 60 و90 دقيقة. ويمكن لتجهيزات تامة الأتمتة، مصمّمة بحيث لا تطرح أي ماء، أن تتحكّم بالسيرورة وتوثيقها، إضافة إلى إلغاء النفايات المائية. بالمقارنة، كانت السيرورة السابقة تعمل بحمامات عالية المحتوى من السيانيد، وكانت مدد المعالجة فيها طويلة، إضافةً إلى توليدها كميات كبيرة من النفايات الملحية.

### سيرورة النتردة والكربدة

أثناء النتردة والكربدة، تُغطَّس القطعة في وعاء يحتوي ملحاً مصهوراً. ويتفاعل النيتروجين والكربون الموجودين في الملح مع الحديد على السطح، فتتكوَّن طبقة مركَّب سطحية مع منطقة تغلغل تحتها. تتألف طبقة المركَّب من نيتريدات الحديد أو الكروم أو من مركَّبات أخرى مثلها، اعتماداً على العناصر الخالطة في الفولاذ، إضافة إلى مقادير صغيرة من الكربيدات.

تُحقِّق طبقة المركَّب، التي يقع عمقها بين 2.5 و20 ميكرون، تحسُّناً في مقاومة الاهتراء والتآكل، إضافة إلى تحسُّن أدائها في أثناء العمل، ومقاومتها للشدّ عند الحرارة المرتفعة. وتختلف قيم قساوة ـ يكرز في طبقة المركَّب، مقاسة في المقطع العرضاني، من 700 للفولاذات غير المخلوطة، حتى 1600 في الفولاذات الغنية بالكروم. لاحظ أن هذه الطبقة تتشكَّل من المعدن الأساسي وتصبح جزءاً

متكاملاً منه، ولذا لا تُعتبر طلاء. ويمكن لمنطقة التغلغل أن تمتد حتى عمق 1 مم، اعتماداً على نوع الفولاذ. وتسبب منطقة التغلغل هذه زيادة في مقاومة الانحناء الدوّار (Rotating Bending)، ومقاومة تعب الدحرجة (Rolling Fatigue)، إضافة إلى قابلية التحميل الضغطي.

يمكن تطبيق النتردة والكربدة بالحمّام الملحي على كثير من المعادن الحديدية، من الفولاذات الفقيرة بالكربون حتى فولاذات الأدوات، ومن الحديد الصبّ حتى الفولاذات العديمة الصدأ. وهي:

- تحسِّن مقاومة الاهتراء والتآكل
- وتخفِّض التخرُّش السطحي
- وتزيد مقاومة التعب
- وتزيد قساوة السطح
- وتحقِّق النتائج التي يجري توقُّعها وتكرِّرها
- وتعطي سطوحاً متجانسة، حتى بوجود منحنيات سطحية وسماكات متغيّرة في القطعة نفسها أو الدفعة المُعالَجة
- وتحافظ على سلامة الأبعاد
- وتقلِّص مدد المعالجة
- وتتصف بالمرونة وسهولة التشغيل.

تقع درجات حرارة المعالجة عادةً حول 580 مْ. لكن في حالة الفولاذات ذات نسبة الخلط العالية، وفي فولاذات الأدوات والفولاذات العديمة الصدأ، يمكن لدرجة الحرارة هذه أن تؤدّي إلى انخفاض في قساوة لب المادة. من ناحية أخرى، غالباً ما تكون المزايا المذكورة آنفاً، التي تنجم عن تغلغل النيتروجين والكربون في

سطح المعدن، إضافة إلى المعالجة ضمن حمّام سائل، ضرورية للتطبيقات التي يكون فيها انخفاض قساوة اللب غير مقبول. لذا، جرى تطوير سيرورة جديدة منخفضة درجة الحرارة اسمها التجاري هو مِلونايت المنخفضة درجة الحرارة[50] (Low temperature melonite).

تحصل هذه السيرورة عند درجة حرارة تساوي 480 مْ، مع أنها يمكن أن تعمل في المجال من 480 حتى 520 مْ. من مزايا هذه السيرورة:

- الحفاظ على قساوة اللب ومقاومة الشدّ في ظروف التحميل.
- إمكان تكوين طبقة مركَّب رقيقة جداً.
- تشوّه قليل جداً.
- إمكان منع تكوُّن طبقة المركَّب على فولاذات أدوات القطع.
- إمكان تفصيل صلابة السطح وطبقات التغلغل وفق الرغبة.

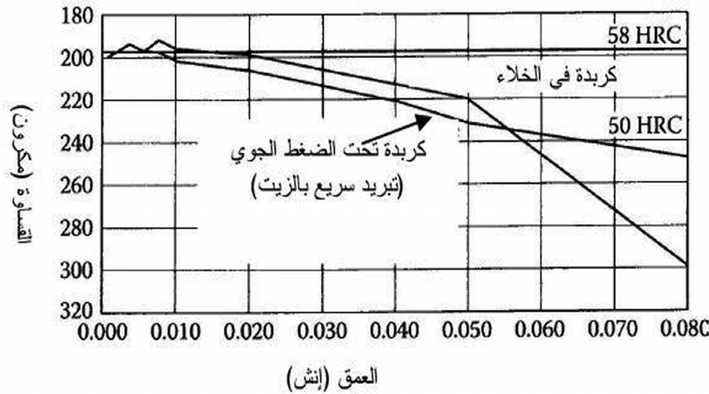
إن هذه السيرورة المنخفضة درجة الحرارة مفيدة للفولاذات ذات نسبة الخلط العالية، ومنها الفولاذات العديمة الصدأ، وفولاذات الأدوات وقوالب التشكيل، وفولاذات أدوات القطع. بمعالجة الأدوات عند درجات حرارة منخفضة، أي عند 520 مْ مُدَداً بين 30 و60 دقيقة، تتكوَّن طبقة النيتريد المطلوبة، من دون حصول أي هشاشة.

## الكربدة تحت التخلية

يجب ألا يكون ثمة فارق بين كربدة علبة سرعة في الهواء أو في الخلاء، لأن النتيجة النهائية سوف تكون نفسها في الحالتين،

أليس كذلك؟ بلى، ثمة فارق! إن جميع المنتجات اليوم تقريباً تُهندس لتحقيق أداء أفضل عند تكلفة أقل ومقاسات أصغر. على سبيل المثال، تتطلب مواصفات نقل الحركة معدّلات قدرة أعلى تُولِّدها علب سرعة أصغر. وإطالة العمر وتحسين الأداء باتا من الضروريات لدى المصنِّعين اليوم. ولا تتحقّق تلك المتطلبات إلا بالكربدة تحت التخلية عند ضغط منخفض.

لقد أُثبت أن المكوِّنات المكربدة في الخلاء والمبرَّدة بسرعة بالزيت تدوم مدة أطول بنحو 20000 دورة عمل، وتتصف بقيم تعب انحناء أعلى من تلك التي لنظيراتها المكربدة في الهواء. يُضاف إلى ذلك أنه عند أفضل جزء من علبة السرعة، تكون أشدّ المناطق قساوة (التي تزيد قساوة روكويل (Rockwell) فيها عند السلّم C على 58) أعمق كثيراً في علبة مكربدة في الخلاء (الشكل 12 ـ 26). وثمة أيضاً نزوع إلى انخفاض التشوّه الناجم عن المعالجة الحرارية، ليس فقط بسبب التبريد السريع بالغاز، بل بالزيت أيضاً[52][51].




**الشكل 12 ـ 26: عمق محسَّن لقساوة شديدة بالكربدة في الخلاء [51].**

ثمة تقانة جديدة للكربدة تحت ضغط منخفض هي VringCarb يُستخدم فيها حلقي الهكسان (Cyclohexane) ($C_6H_{12}$)، وهو سائل عالي الكثافة وشديد النقاوة والاستقرار. ويتوفّر هذا الهيدروكربون المشبع عملياً بتكلفة منخفضة. ويُدخل إلى حجرة التسخين باستخدام نظام موثوق لحقن السائل متحكّم به بدقة عند ضغوط تساوي تقريباً 13.3 ميلي بار. ولم يُلاحظ أي ترسُّب لسخام كربوني في السيرورة[51]. وقد ثبت أن الكربدة تحت التخلية بهذه السيرورة الجديدة تحقِّق المزايا الآتية:

- قطعٌ شديدة النظافة.
- إلغاء الأكسدة بين الحُبيْبات.
- نسبة قساوة قعر الطبقة المكربدة إلى قساوة سطحها تزيد على 90 في المئة.
- استهلاك منخفض جداً لحلقي الهكسان.
- أعماق قساوة متجانسة.
- تشوُّه منخفض.
- درجات حرارة كربدة أعلى.

ومن التطوّرات الأخرى السيرورة (Infracarb) للتحكُّم الدقيق في الكربدة تحت التخلية المنخفضة الضغط. تحصل الكربدة عند ضغط يقع بين 1 و8 ميلي بار، وتتناوب فيها إضافة غاز هيدروكربوني في أثناء مرحلة الإقلاع مع إضافة غاز محايد (النيتروجين) في أثناء مرحلة التغلغل. نحو 95 في المئة من منشآت الكربدة تحت التخلية في العالم تستخدم البروبان مصدراً للكربون، وتستخدم الـ 5 في المئة المتبقّية الأسيتيلين. تمكّن نظم التحكُّم

الشامل هذه من تحديد موسّطات الحرارة والكربدة والتبريد السريع، وهذا ما يجعل التجهيزات تعمل وكأنها آلات تشغيل مبرمجة. وقد أُجري عمل ميداني مكثّف مع تبريد سريع بغاز نيتروجين عالي الضغط لفهم التحوُّلات والتشوُّهات التي تتعرض لها القطع، والتوقّع بها.

وتصاميم الأفران متوافرة بحجرتين أو أكثر. وخلايا التبريد السريع بالزيت والغاز العالي الضغط متوافرة. وفي الواقع، ثمة 45 منشأة تمتلك مرفق تبريد سريع بغاز النيتروجين العالي الضغط (20 بار)، منها 11 مرفقاً عمودي التصميم. والتصميم على شكل وحدات منفصلة يمكِّن من التوسع بسهولة ومن إضافة خلايا كربدة وتبريد في المستقبل.

إن التطوّرات في التحكّم الحاسوبي بالسيرورات، وابتكار أنواع جديدة من الفولاذ، والتحسين المستمر في تقانة التبريد السريع بالغاز العالي الضغط، والتصاميم الجديدة لتجهيزات التخلية، تمثِّل جميعاً القوة المحرّكة لانبعاث الكربدة تحت التخلية بوصفها سيرورة قادرة على الكربدة الإنتاجية. وباستخدام تركيب معيّن من الإيثيلين ($C_2H_4$) والأسيتيلين ($C_2H_2$) والهيدروجين عند ضغوط بين 1.3 و40 ميلي بار يجعل هذه التقانة ملائمة للمعالجة الحرارية بتكلفة منخفضة.

## الغزْل الكهربائي

الغزل الكهربائي (Electrospinning) هو طريقة لصنع ألياف دقيقة جداً من دون ميكرويّة بواسطة سيرورة الشحن الكهربائي لمحاليل بوليمرية بجهد كهربائي يصل إلى آلاف الواطات. إن طريقة صُنع الألياف الصناعية هذه معروفة منذ عام 1934، حينما سُجِّل أول اختراع للغزل الكهربائي باسم فورمهالس[53] (Formhals)، ومنذ ذلك

الوقت، نُشر الكثير عنه، وسُجِّل العديد من براءات الاختراع.

## سيرورة الغزل الكهربائي

تتصف الألياف النانوية، وهي ألياف تقل أقطارها بمئة مرة عن أقطار ألياف القماش العادية، بنسبة مساحة سطح إلى كتلة كبيرة جداً، وهذا ما يوفّر مزايا من حيث الأداء تمتد من هندسة النسيج إلى الملابس الواقية إلى حوامل محفِّزات وأغشية للتفاعلات الكيميائية. لكن نظراً إلى اعتبارات التكلفة والعوامل الأخرى من قبيل مسائل الأمان والصحة، لا يوجد حالياً إلا القليل من السيرورات الكُفوءة والاقتصادية لصنع ألياف عالية الجودة على نطاق تجاري. لذا ثمة عمل قيد التنفيذ لتصميم وبناء وتعرض آلة سريعة تغزل كهربائياً، بتكلفة منخفضة، حصائر من ألياف نانوية بوليمرية تقل أقطارها بـ 10 ـ 100 مرة عن أقطار الألياف المعهودة اليوم، وذلك للتطبيقات الصناعية والعسكرية والاستهلاكية والرعاية الصحية والبيئية. إن الغزل الكهربائي سيرورة معقّدة تضم جوانب من علم البوليمرات والكهرباء الساكنة وميكانيك السوائل وعدة مجالات فرعية أخرى من الهندسة. يُطبَّق في هذه السيرورة جهد كهربائي عالٍ على أنبوب رفيع (شعري) مملوء بمحلول بوليمري، فيُقذف تيار مستمر من السائل، وينقسم التيار إلى نفثات دقيقة، وبعد تبخّر المذيب، تُصلَّد الألياف الناتجة وتُجمع[1]. إن التحدّي التقني الرئيس، الذي يواجه تحويل سيرورة الصنع الحالية المحدودة الإنتاج إلى سيرورة تصنيع كمّي واسع النطاق لمواد من الألياف النانوية للتطبيقات التجارية، هو تحقيق معدّل تدفّق كمّي أكبر ضمن كل نفثة تخرج من الأنبوب الشعري. ومن الصعوبات الأخرى التعامل مع الشحنة الكهربائية وتصميم المكوِّنات وتبخير المذيب وجمع الألياف جمعاً متجانساً، وتقنيات المعالجة اللاحقة.

## تطبيقات الغزل الكهربائي

برغم تاريخ تقانة الغزل الكهربائي الطويل، فإن أليافها لم تُستخدم قط في نسيج طبقات الأغشية الواقية. وقد جرى تطوير هذه التقنية الجديدة لدى الجيش الأميركي بغرض توفير حماية للجنود من ظروف الطقس القاسية، وتحسين تهوية القماش، وزيادة مقاومته للريح، وتحسين مقاومته للمواد الكيميائية السامة.

باختصار، تُعتبر الأغشية الليفية المغزولة كهربائياً بُنى شديدة المسامية يمكن إنتاجها من عدة مستحضرات من البوليمرات والمذيبات. ويمكن تحقيق مسامات تقع أقطارها بين 0.1 و2.6 ميكرون باستخدام الغزل الكهربائي للمذيبات. وقد بيَّنت قياسات نقل الهواء والرطوبة المُجراة على حصائر ألياف تجريبية مغزولة كهربائياً أن خواص تلك الحصائر تفوق خواص أقمشة البطائن المستخدمة حالياً في الملابس الواقية. وتتصف الطبقات المصنوعة من ألياف مغزولة كهربائياً بممانعة أصغرية لتغلغل بخار الماء الضرورية للتبريد التبخيري. وتُظهر القياسات التجريبية أن حصائر الألياف المغزولة كهربائياً شديدة الفعالية في احتجاز الجُسيْمات المحمولة في الهواء، أي الهُباب. وكفاءة الترشيح الكبيرة هذه هي نتيجة مباشرة للألياف من دون الميكرويّة الناجمة عن سيرورة الغزل الكهربائي. وقد طُبِّقت طلاءات ألياف مغزولة كهربائياً مباشرة على أقمشة غير نسيجية وعلى مواد إسفنجية مفتوحة الخلية، ووُجد أن مقاومة تدفّق الهواء وخواص ترشيح الهباب تترابط مع وزن طلاء الألياف المطبَّق. وقد أُلغي نفاذ المعلقات عبر الإسفنج، الكبير عادة، بطبقات رقيقة جداً من الألياف النانوية المغزولة كهربائياً المبخوخة على سطح الإسفنج. إن كفاءة الأوساط المغزولة كهربائياً الترشيحية تضاهي كفاءة ألياف الأوليفين المشحونة بالكهرباء الساكنة.

وإضافةً إلى تحقيق حماية كبيرة من الهباب، يبدو أن أغشية الألياف المغزولة كهربائياً تحسِّن فعالية المضافات التفاعلية في الحماية من المواد الكيميائية. إلا أن استطالة ومقاومة الأغشية المطّاطية المحضّرة بهذه الطريقة من البولي يوريتان الحراري التلدُّن تساوي تقريباً نصف تلك التي للطبقات الرقيقة المستمرة المصنوعة من نفس المادة. لذا يجب تحسين خواص الشدّ في أغشية الألياف النانوية تلك. ثمة تقنيات تصنيع جديدة في قيد التطوير حالياً، قد تمكِّن يوماً ما من إنتاج مواد الأغشية الجديدة المتعدّدة الوظائف تلك التي تُصنع من الألياف النانوية والميكرويّة[55][58].

من التطبيقات المستقبلية الممكنة للطبقات المصنوعة من الألياف المغزولة كهربائياً التوضيع المباشر على الملابس، وهذا ما يلغي مراحل تصنيعية مكْلِفة كالطلاء والشَيّ. ومن الممكن غزل الألياف مباشرةً على مجسَّمات ثلاثية الأبعاد تُصنع من خلال مسح الجسم حاسوبياً مسحاً ثلاثي الأبعاد. في المستقبل، سوف يتمكن مصنِّعو الملابس من استخدام نظام رقمنة ضوئي قائم على المسح الليزري لتكوين مُحاك لسطح جسم الشخص الذي سوف يرتدي اللباس[59]. ويمكن مكاملة هذه المعلومات مع سيرورتي التصميم والتصنيع بمساعدة الحاسوب للتمكين من بخ الألياف المغزولة كهربائياً على المجسَّم المُرقْمن لإنتاج ملابس عديمة الوصلات مطابقة للجسم. لقد استُخدم هذا المفهوم فعلاً في صنع ملابس جديدة مصنوعة على شكل غشاء مطّاطي لسباقات السباحة. يُستخدم في لباس السباحة MACH1 المصمَّم من قبل الشركة Dianasport الإيطالية سليكون مطّاطي مقولب بحجمين فقط باستخدام قالب من الفولاذ مصمّم حاسوبياً للحصول على الأشكال السطحية المتناظرة المرغوب فيها لتخفيف الكبح في الماء.

من الواضح أن إمكانات صنع لباس يغطي الجسم من الرأس حتى الأصابع لأغراض الرياضة والحماية باستخدام قوالب مولَّدة حاسوبياً تتطور بخطى حثيثة، ويمكن أن تكون قريباً جاهزة لصنع ملابس مطّاطة من ألياف مغزولة كهربائياً.

---

## غزْل حرير العنكبوت

يُعدُّ حرير العنكبوت (Spider Silk) من أقوى المواد المعروفة، إلا أنه قد تبيَّن أن إنتاج حرير صناعي مقاومته للشدّ تماثل تلك التي لحرير العنكبوت الطبيعي صعب من الناحية الاقتصادية. ومع ذلك تقوم وزارة الدفاع الأميركية بتشجيع البحث في تطوير أسلحة كأسلحة الرجل العنكبوتي من حرير العنكبوت.

يُحاول العلماء منذ مدة طويلة حل الأسرار الجُزَيئية لحرير العنكبوت نفسه. والأمل هو أن يكون بالإمكان يوماً ما نسج هذا الحرير على شكل أشياء مختلفة من دروع الجسم المنيعة حتى الحبال المقاومة للاهتراء والمظلات الجوية والملابس العسكرية.

إن حرير العنكبوت، الذي هو أرفع من شعرة الإنسان وأخف من القطن، أمتن بثلاث مرات من الكفلار، المادة الصناعية المستخدمة في سترات الوقاية من الطلقات النارية، وأقوى بخمس مرات من سلك الفولاذ.

وخلافاً للكفلار، الذي يحتاج لإنتاجه إلى ضغط شديد وإلى الـ $H_2SO_4$ السام، يستطيع العنكبوت صنع حريره عند درجة حرارة الغرفة وتحت الضغط الجوي العادي، باستخدام البروتينات والماء، إضافة إلى أشياء قليلة أخرى. لكن النجاح في إنتاج كميات كبيرة منه صناعياً في المختبر يسير سيراً بطيئاً. ففي الواقع، العناكب متفوِّقة علينا ببضعة ملايين من السنين.

لقد استبعد العلماء منذ مدة طويلة أكثر الحلول جلاءً لجني الحرير: «مزارع العنكبوت». فخلافاً لدود القز الذي يمضغ ورق التوت، والذي تُقدَّر عالياً أليافه المتلألئة في عالم الأزياء، فإن العناكب حيوانات مفترسة. احبسْها في مكان مغلق، تجد بعد حين أن بعضها قد أكل بعضها الآخر. لذا التفت العلماء إلى علم المورثات، وجرى فك ترميز مورّثتين من حرير العنكبوت في عام 1990.

تُنتِج هاتان المورّثتان حرير الشدّ، وهو أقوى أنواع حرير العنكبوت السبعة، ويُستخدم في تأطير الشبكة العنكبوتية وفي تدلّي العناكب عليه.

والخطوة التالية هي إنتاج البروتينات التي تصنعها هاتان المورّثتان. لقد جرى توليد قطيع من الماعز المهندَس وراثياً والمصمَّم ليُنتِج في حليبه بروتينات حرير العنكبوت. ولم يكن ذلك الحرير رخيصاً، فقد كلَّف 1500 دولار/غرام.

ليس إنتاج بروتينات الحرير الرخيصة سوى جزء من المشكلة. فعلى العلماء بعدئذٍ غزله. في الواقع، العناكب لا تغزل الحرير، بل تعصره. يُدفع بروتين الحرير السائل عبر غدد إصبعية على بطن العنكبوت تسمّى المغازل. بعدئذٍ يقوم العنكبوت بمطّ تلك الفتائل بأرجله لصف جُزَيئات بروتينات الحرير.

وفي عام 2002، قلَّد الباحثون سيرورة العصر تلك ميكانيكياً، وكوَّنوا فتيلة، لكنها كانت ممتطةً أكثر قليلاً من حرير العنكبوت الحقيقي، وأقل قوة. وقفز بعض المهندسين فوق تحدّيات الحرير الطبيعي ليبتكروا تطبيقات مستوحاة إلى حد ما من العنكبوت. ونتيجة ذلك، قام خبراء العنكبوت في جامعة أكسفورد بإنجلترا بتطوير تجهيزة يعتقدون أنها يمكن أن تُساعد على كسر ذلك الحاجز بتقليد

الغزل العنكبوتي. يبدأ أولئك الباحثون، الذين يخططون لتسويق طريقتهم تجارياً، ببروتينات دودة القز. تُنتِج تلك التجهيزة أليافاً لامعة أقطارها تساوي 15 ـ 20 ميكرون. ويُستخدم فيها غشاء خاص لتقليد الظروف التي يعمل ضمنها عضو صنع الحرير لدى العنكبوت، وضمن تلك الظروف تتجمع البروتينات ذاتياً في لُيَيْفات نانوية. إن صنع ألياف كبيرة من اللُّيَيْفات النانوية سهل لأن كل ما يجب فعله هو سحبه من التجهيزة. فالجُزَيئات تلتصق معاً في التجهيزة وتخرج على شكل خيط جميل. من الاستخدامات الممكنة لهذه الخيوط عمليات زرع الأعضاء الطبية، وأحزمة الأمان، والمواد المركَّبة المستخدمة في هيكل السيارة، والملابس الواقية، والأحذية الرياضية المديدة العمر، وكل شيء تقريباً يمكن أن يستفيد من مادة فائقة المتانة ومقاومة الشدّ. ويعمل الباحثون على تحسين تلك التجهيزة ويعتقدون أن أليافاً مغزولة صناعياً لها متانة ومرونة حرير العنكبوت سوف تنزل إلى الأسواق في ما بين عامي 2007 و2010.

## تشكيل المواد الحرارية التلدُّن بالكبس

تتصف المواد الحرارية التلدُّن المقوَّاة بالألياف بمزايا عدة مقارنةً بالمواد الحرارية التصليد من حيث خواص المادة. يُضاف إلى ذلك أنه برغم أن تلك المواد غالية نسبياً، فإن طرائق التصنيع المخصّصة للمواد المركَّبة ذات الحاضنة الحرارية التلدُّن توفِّر فرصاً لتشكيل مكوِّنات منخفضة التكلفة. لقد صُنع عدد من قطع الطائرات ذات الأشكال المنحنية البسيطة، كأبواب آليات الهبوط، ولوحات الأرضيات، والأضلاع، وصفائح الجسم الخارجية[61][60]. ومن بين السيرورات التي استُخدمت لصنع مكوِّنات إنشائية جوية وفضائية من المواد المركبة، ذات الحاضنة الحرارية التلدّن، التشكيل بالكبس،

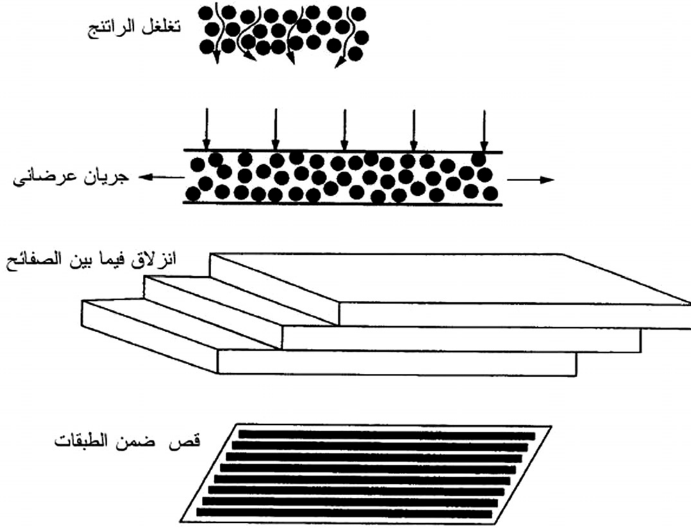
وهي سيرورة تقلّص الحاجة إلى اليد العاملة ومدة المعالجة. بالابتداء بصفيحة أولية التصليد، أو بكدسة من الطبقات المنفصلة، تُسخَّن المادة وتُنقل إلى المكبس وتُشكَّل تحت الضغط لتعطي منتَجاً شبه نهائي جاهزاً للعملية التالية. إلا أن التصنيع الناجح للقطع الكبيرة المعقّدة يواجه مشكلات عديدة. صحيحٌ أن كثيراً من المواد يمكن أن تتدلّى وتأخذ أشكالاً متكيّفة مع انحناءات معقّدة في سيرورات تشكيل بطيئة من قبل التشكيل الغشائي (Diaphragm Forming)، إلا أن سك صفيحة مستوية من مادة مركَّبة مستمرة الألياف لتأخذ شكلاً منحنياً معقّداً يمكن أن يؤدّي إلى التجعُّد أو التقنطُر أو تكسُّر الألياف. من ناحية أخرى، فإن سيرورة التجربة والخطأ التي تتضمّن إعادة تصميم أدوات التشكيل وصنعها مستنزفةً للوقت وباهظة التكلفة. لذا فإن استخدام مُحاكٍ للسيرورة في تصميم القطعة وأدوات التشكيل يمكن أن يكون مفيداً في تحديد إنْ كان من الممكن صنع قطعة من مادة معيّنة بتوضُّع وشكل معيّنين بنجاح.

تُعتبر المواد المركَّبة الحراريّة التلدُّن، المقوَّاة بالألياف المستمرة، أصعب تشكيلاً بكثير من تلك غير المقوَّاة، أو المقوَّاة بألياف قصيرة، بسبب وجود المقوِّي القاسي. ويتحدَّد تعقيد المكوِّنات، التي يمكن تشكيلها من صفيحة حرارية التلدُّن مقوَّاة بألياف مستمرة، بقابلية ألياف التقوية للحركة، في المقام الأول، وبالتوافق مع قالب التشكيل أيضاً. ثمة أربع سيرورات مختلفة يجب أن تحصل ضمن الصفيحة حين التشكيل، ثلاث منها يتضمّن تحريك الألياف. تلك السيرورات، التي وصفها كوغزويل[62] (Cogswell) والمبيّنة في الشكل 12 ـ 27، هي:

- تغلغل الراتنج.
- الجريان العرضاني.

• الانزلاق في ما بين الصفائح.

• القص داخل الصفيحة.




**الشكل 12 ـ 27: آلية تشكيل الصفائح**[62].

المقصود بتغلغل الراتنج انسياب الحاضنة البوليمرية اللزجة خلال أو على طول شبكة الألياف المقوِّية. إن التغلغل، الذي يحصل إلى حد ما في جميع أنواع عمليات التشغيل، هو السيرورة التي تمكِّن من التصاق الطبقات وإزالة الفراغات. والجريان العرضاني هو الانتشار الموضعي لطبقة مشرّبة سابقاً ينجم عادةً عن تطبيق ضغط على المادة. والانزلاق في ما بين الصفائح هو انزلاقها كل على حدة بالنسبة إلى الأخريات، وأخيراً، القصّ داخل الصفيحة هو التشوُّه الانزلاقي الذي يحصل في المستوي ضمن الطبقة[63][70].

## زرع الشوارد

زرع الشـوارد (Ion Implantation) ضـروري لـتـصـنـيـع الـدارات المتكاملة الحديثة. تعتمد إشابة وتعديل السليكون وغيره من مواد الركائز على هذه التقانة التي تتضمّن توليد حزمة شوارد وتوجيهها نحو الركيزة لتستقر تحت السطح. يمكن السماح للشوارد بالانتقال عبر الحزمة بالطاقة التي انتُزعت بها من المادة المصدر، أو يمكن تسريعها أو تبطيئها بحقل كهربائي مستمر أو متناوب في مجال الترددات الراديوية.

يستخدم مصنّعو أنصاف النواقل اليوم زرع الشوارد في كافة أنواع إشابة السليكون في الدارات المتكاملة تقريباً. وأكثر أنواع الشوارد شيوعاً في الزرع هي شوارد الزرنيخ والفوسفور والبورون وثاني فلوريد البورون والإنديوم والأنتيموان والجرمانيوم والسليكون والنيتروجين والهيدروجين وهيليوم. لقد بدأ زرع الشوارد في القرن التاسع عشر، ومنذئذ، جرى تحسينه باستمرار. وقد ساعد الفيزيائي روبرت فان دي غرافّ (Robert Van de Graaff)، من معهد ماساشوستس للتقانة MIT وجامعة برينستون، على بناء المسرّعات الأولى وتقانة الجهود الكهربائية العالية التي انبثقت عن هذا العمل[71].

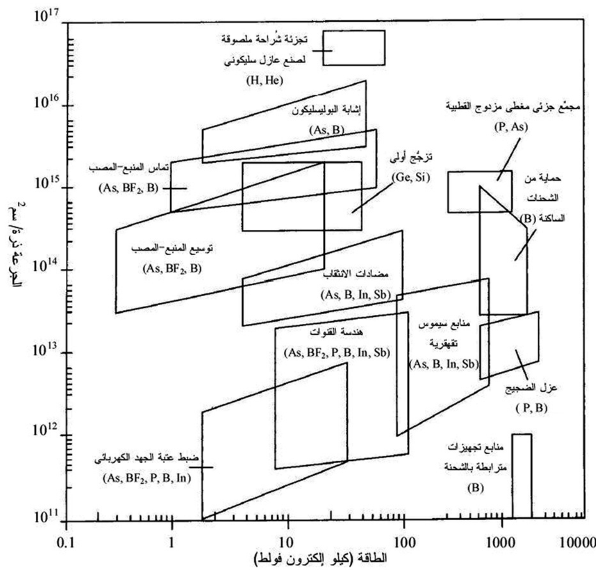
والتقت تجهيزات زرع الشوارد مع تطبيقاته تدريجياً في ستينيات القرن العشرين. وحسَّنت الخبرة المكتسبة من بناء المسرّعات في مجال البحث وثوقية التجهيزات، وأدت إلى ظهور تقنيات جديدة لتنقية ونقل حزم الشوارد. ونقَّح الفيزيائيون فرضية إيقاف الشوارد التي مكَّنت من التوضيع الدقيق للشوارد اعتماداً على طاقتها وعلى زاوية الزرع، وحدَّدت التجارب أن التطرية في ما بعد الزرع عند درجات الحرارة العالية يمكن أن تُصلح الضرر الذي يصيب البلّورات نتيجة الزرع. في البداية، كانت التطرية تُجرى عند درجات حرارة بين 500

و700 مْ، لكن بعد بضع سنوات، وجد مصنِّعو أنصاف النواقل أن درجة حرارة التطرية المثلى تقع بين 900 و1100 مْ. وبعد حل مشكلة مكاملة سيرورة زرع الشوارد، حلت بسرعة محل التغلغل الحراري للشوائب المرسَّبة بوصفها الطريقة الرئيسة لإشابة أنصاف النواقل، لأنها أكثر دقة ووثوقية وقابلية للتكرار بالمواصفات نفسها.

يُعدُّ زرع الأيونات فريداً تقريباً، من بين تقنيات معالجة أنصاف النواقل، من حيث أن موسّطات المعالجة، كتركيز وعمق تغلل الشائبة المرغوب فيهما، تتحدَّد مباشرة ببرمجة التجهيزات بكمية الشائبة وطاقتها. وهذا يختلف عما هو موجود في سيرورة توضيع البخار كيميائياً، التي تمثِّل فيها سماكة الغشاء وكثافته توابع معقّدة لإعدادات التجهيزات القابلة للبرمجة، التي تتضمّن درجة الحرارة ومعدل تدفّق الغاز. وقد ازداد عدد الزرعات اللازمة لاستكمال دارة متكاملة مع نمو تعقيد الدارات. ففي حين أن معالجة نصف ناقل بسيط، مكوَّن من أُكسيد معدن سالب الشحنات، كانت تتطلب في سبعينيات القرن العشرين 6 ـ 8 زرعات، فإن دارات السيموس الحديثة التي تتضمّن ذاكرة يمكن أن تحتوي على 35 زرعة.

تتطلب تطبيقات هذه السيرورة جرعات من الشوائب والطاقات تمتد على مجال عدة مراتب كِبَر. وتقع معظم أنواع الزرع في واحد من المؤطرات المبيّنة في الشكل 12 ـ 28. إن حدود المؤطّرات تقريبية، وتتغيّر السيرورات من مؤطّر إلى آخر بسبب المقايضات التصميمية. وقد انخفضت احتياجات الطاقة في كثير من التطبيقات بسبب التكامل المتزايد للدارات. وساعد شكل الإشابة التي هي أقل عمقاً على الحفاظ على النسب البُعدية ثابتة تقريباً مع تقلّص أبعاد الدارة الجانبية. وتنخفض جرعات الشوارد عادةً مع انخفاض الطاقات، لكن ليس دائماً. وينخفض عرض التوزُّع الإحصائي للشوارد المغروزة مع الطاقة، وهذا يقلِّل الجرعة اللازمة للحصول

على تركيز أعظمي معيّن للشوائب. ونتيجة لذلك تظهر الخطوط المائلة في الشكل 12 ـ 28. يُعتبر الزرع في الواقع ذا كفاءة منخفضة جداً في من حيث تعديل تركيب المادة. فأكبر مقدار زُرع من الشوارد مع خرج اقتصادي يساوي نحو $10^{16}$ ذرّة/ سم$^2$، وهذا لا يساوي إلا نحو 20 طبقة ذريّة. أما ما يجعل الزرع عملياً فهو الحساسية الشديدة لناقلية أنصاف النواقل لتركيز الشوائب.




**الشكل 12 ـ 28**: **مقادير الجرعات والطاقات اللازمة لتطبيقات الزرع الشاردي الرئيسة (المواد مرتَّبة من اليسار إلى اليمين تبعاً لمعدلات استخدامها)**[71].

تتغيّر طاقة الشوارد من أقل من 1 كيلو إلكترون فولت حتى أكثر من 3000 كيلو إلكترون فولت. يتطلب تسريع الشوارد حتى طاقات أعلى، مسار حزمة أطول، إلا أنه من الصعب نقل الحزم المنخفضة الطاقة سليمة مسافات طويلة، لأن مقطع الحزمة العرضاني يتوسع إلى درجة لا تستطيع عندها الحزمة متابعة السير ضمن أنبوبها. إن هذه

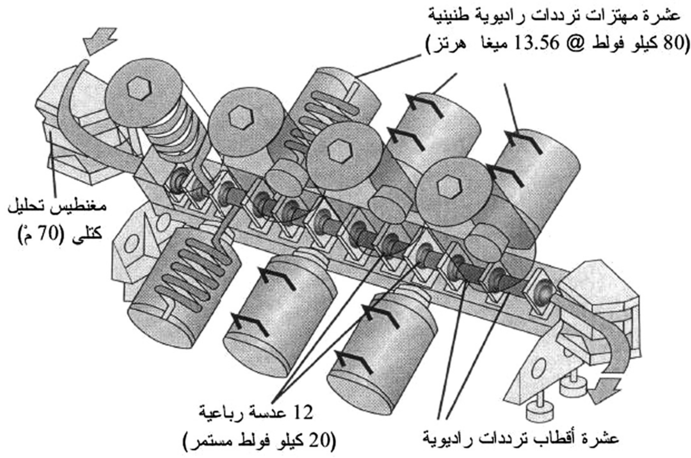
القيود الفيزيائية الأساسية تجعل بناء مسار حزمة قادر على حمل جميع الطاقات اللازمة مستحيلاً تقريباً. يشير الشكل 12 ـ 28 إلى أن أكبر مقدار من الشوائب اللازمة يحصل عند منتصف محور الطاقة. ونظراً إلى أن مقدار الشوارد المغروزة يساوي من حيث المبدأ شحنة الحزمة مضروبة بمدة الزرع، فإن تيارات الحزمة المتوافرة في المجال 5 ـ 200 كيلو إلكترون فولت يجب أن يتغير بأربع مراتب كبَر على الأقل لتنفيذ جميع الزرعات المطلوبة بكفاءة.

ثمة ثلاثة أصناف للزرع الشاردي: زرع بتيار شديد، زرع بتيار متوسط، زرع عالي الطاقة. ووفقاً لما يوحي به الاسم، فإنّ الزرع الشديد التيار يولِّد أشدّ تيارات الحزمة التي تصل حتى 25 ميلي أمبير. وفي تطبيقات الكميات الكبيرة، كلما كان تيار الحزمة أشدّ، كان الزرع أسرع، وهذا يعني ازدياد عدد الدارات المعالجة في مدة معيّنة.

وصُمِّمت عمليات الزرع المتوسطة التيار لتحقيق أكبر تجانس في الجرعة المزروعة، مع قابلية أشدّ للتكرار بنفس المواصفات. تقع تيارات هذا النوع بين 1 مكرو أمبير و5 ميلي أمبير، عند طاقات تقع بين 5 ونحو 600 كيلو إلكترون فولت. ويمكن لمحطات معالجة الرقاقات الانتهائية أن تزرع شوارد بزوايا تصل حتى 60 درجة مع الناظم على سطح الرقاقة. وهذا ضروري لتطبيقات معيّنة، من قبيل الزرع غير النافذ، على سبيل المثال، حيث يجب على الشوائب أن تُزرع جزئياً تحت بنية بوابة جرى تشكيلها من قبل.

أخيراً، الزرع العالي الطاقة هو فقط الذي يتضمّن توليد حزم شوارد تصل طاقاتها حتى الميغا إلكترون فولت. تولِّد تجهيزات الزرع التجارية العالية الطاقة تيارات حزم لشوارد مشحونة إفرادياً تصل حتى 1 ميلي أمبير تقريباً. ويمكن لطاقات الشوارد المشحونة المتعدّدة أن تصل حتى نحو 4000 كيلو إلكترون فولت، مع تيارات حزمة تصل حتى نحو 50 ميكرو أمبير. ويمكن لتلك التجهيزات توليد حزم بطاقات منخفضة تصل

حتى 10 كيلو إلكترون فولت، وهذا ما يجعلها ملائمة لكثير من التطبيقات المتوسطة التيار أيضاً. إن تعدّدية الوظائف هذه تبرّر تكلفة اقتناء تلك الآلات. وآلات الزرع العالية الطاقة، التي يُستخدم فيها كل من التسريع الخطي بالتردّدات الراديوية (الشكل 12 ـ 29) وبالتيّار المستمر، واسعة الانتشار اليوم في صناعة أنصاف النواقل.




**الشكل 12 ـ 29: رسم توضيحي لمسرِّع خطي بالترددات الراديوية لاستخدامه في الزرع الشاردي العالي الطاقة**[71].

يبلغ سعر آلة زرع شوارد حديثة نحو 2 ـ 5 مليون دولار، اعتماد على نموذج وحجم الرقاقة التي تعالجها. ومن بين آلات فئات الزرع الثلاث، مثَّلت آلات التيار الشديد أكبر سوق من حيث العائدات وعدد الآلات المباعة[77][72].

## الصب الهلامي

يُعدُّ الصبّ الهلامي (Gelcasting) سيرورة صبّ بسيطة نسبياً تعطي شكلاً شبه نهائي، وهي مشابهة لطرائق التشكيل الأخرى

الشائعة (انظر الجدول 12 ـ 6). يُسكب ملاط مائع مكوَّن من مسحوق سيراميكي ومحلول مونومري في قالب ثم يُترك ليتهلَّم في مكانه ويأخذ شكل القالب عند درجة حرارة بين 40 و80 مْ. وبعد إخراج القطعة من القالب، تُجفَّف وتُلبَّد. وحرق الرابط هنا مشابه لحرقه في حالة القطع المكبوسة (0.5 ـ 1 مْ في الدقيقة حتى تصل درجة الحرارة إلى 650 مْ للـ $Si_3N_4$ والـ $Al_2O_3$). ويمكن استخدام مذيب مائي أو عضوي، مع أن المذيب المائي هو المفضّل لأسباب بيئية. ثمة حاجة في هذه السيرورة إلى مقدار صغير من المونومر، وبادئ هلامي، وفي بعض الحالات، إلى محفِّز ومُشابك فقط (3 ـ 4 في المئةو عادةً). يبيّن الشكل 12 ـ 30 مخططاً لسيرورة الصبّ الهلامي.

**الجدول 12 ـ 6**: مقارنةً بين الصبّ الهلامي وسيرورات التشكيل الأخرى[78].

| الخاصية | صب هلامي | صب المعلّق | قولبة بالحقن | صب بالضغط |
|---|---|---|---|---|
| مدة القولبة | 5 ـ 60 دقيقة | 1 ـ 10 ساعات | 1 ـ 2 دقيقة | 0,5 ـ 5 ساعات |
| مقاومة الشدّ في أثناء التشكيل | متوسطة | ضعيفة | كبيرة | ضعيفة |
| مقاومة الشدّ بعد التجفيف | كبيرة جدا | ضعيفة | - | ضعيفة |
| مادة القالب | معدن، زجاج، لدائن، شمع | جص | معدن | لدائن مسامية |
| حرق الرابط | 2 ـ 3 ساعات | 2 ـ 3 ساعات | حتى 7 أيام | 2 ـ 3 ساعات |
| عيوب القولبة | صغرى | صغرى | كثيرة نسبياً | صغرى |
| أبعاد القطعة العظمى | أكبر من 1 متر | أكبر من 1 متر | نحو 30 سم، أحد الأبعاد يجب أن يكون ≤ 1 سم | نحو 0.5 متر |
| الاعوجاج (أثناء التجفيف أو في أثناء حرق الرابط) | أصغري | أصغري | شديد أحياناً | أصغري |
| مقاطع سميكة/رقيقة | سيان | تزيد المقاطع السميكة مدة الصب | مشاكل في أثناء حرق الرابط | تزيد المقاطع السميكة مدة الصب |
| حجم الجُسيْم | تزداد اللزوجة بنقصان الحجم | تزداد مدة الصبّ بنقصان الحجم | تزداد اللزوجة بنقصان الحجم | تزداد مدة الصبّ بنقصان الحجم |

- مزج مسحوق سيراميك مع ماء ومُشتت ومونومر.
- تخلية جزئية من الهواء.
- إضافة المحفّز (بادئ هلامي)
- صب في قالب من المعدن أو اللّدائن أو الشمع.
- تسخين القالب لتكوين الهلام (48 ـ 80 مْ).
- إخراج القطعة من القالب.
- تجفيف عند رطوبة تساوي 90 في المئة.
- تشغيل القطعة في حال الضرورة.
- حرق الرابط (عند 550 مْ) وتلبيد (عند 1800 مْ).

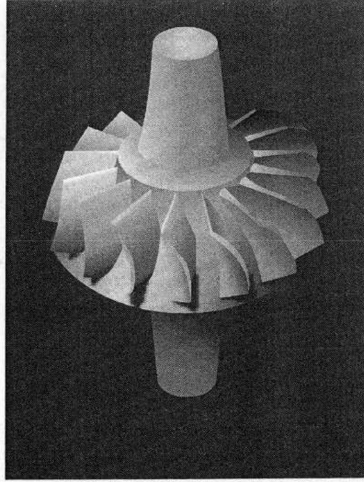
**الشكل 12 ـ 30: مخطط سيرورة الصبّ الهلامي** [78].

يمكن تطبيق هذه السيرورة على طيف واسع من مساحيق السيراميك، ومنها الـ $Al_2O_3$ و$Si_3N_4$ و$SiC$ و$B_4C$ والفرِّيتات وتيتانات الألمنيوم، والزركونيا والسيالون وفوسفات الصوديوم والزركونيوم. ويمكن استخدامها أيضاً لصنع مواد مركَّبة سيراميكية معقّدة الأشكال. ونظراً إلى أن قطع الصبّ الهلامي الغضّة تتصف بمقاومة شدّ كبيرة (3 ـ 4 ميغا باسكال)، فإنه يمكن تشغيل القطع بسهولة، وهذا ما يلغي الحاجة إلى الجلخ العالي التكلفة بعد التلبيد. وفيما يخص مكوِّنات المحرّكات العنفية التي تطوِّرها شركة Honeywell Ceramic Components، تمتد مدة التهلُّم من 10 حتى نحو 60 دقيقة، وتمتد مدة التجفيف من 6 حتى 60 ساعة، أما دورات التلبيد فهي مشابهة لتلك التي في صبّ المعلّق Slip Casting للـ $Si_3N_4$.

ومقارنةً بالقولبة بالحقن، التي تحتاج إلى ما يصل إلى 20 في المئة من الرابط، يُستخدم في الصبّ الهلامي نحو 3 ـ 4 في المئة منه. و يستغرق حرق الرابط في القولبة بالحقن أسبوعاً، في حين أنه يحصل في أقل من يوم في سيراميكات الصبّ الهلامي. ونظراً إلى أن

إزالة الرابط من القطع المقولبة بالحقن أصعب كثيراً، يمكن للعيوب أن تمثِّل مشكلة كبرى. أما في الصبّ الهلامي، فيمكن درء ظهور هذه العيوب في السيراميكات إذا جُفِّفت على نحو جيد.

ويتصف الصبّ الهلامي أيضاً بمزايا عديدة مقارنةً بالصبّ الطيني. فهو أسرع بنحو 50 ـ 80 في المئة، ويرصُّ المسحوق رصّاً أكثر تجانساً، ويعطي قطعاً غضة ذات مقاومة شدّ أكبر كثيراً، ويسمح باستخدام قوالب أبسط (لا حاجة إلى انتزاع الماء من السطوح). وهذه مزايا تجعل أتمتة الصبّ الهلامي أسهل أيضاً.



**الشكل 12 ـ 31: دولاب عنفة محرك نفاث من نتريد السليكون مشكَّل بالصب الهلامي**[78].

يُضاف إلى ذلك أن النجاح الأخير في أداء قطع الـ $Si_3N_4$ الإنشائية المنتَجة بالصبّ الهلامي والخاصة بوحدة التغذّية الاحتياطية في محرّك الطائرة العنفي أدّى إلى طلب قطع أكبر. فقد أبدى الصبّ الهلامي مقدرة كبيرة على تشكيل مكوّنات كبيرة معقّدة ذات مقاطع

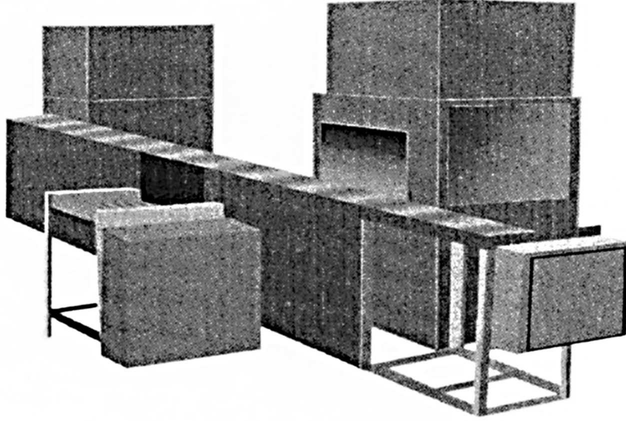
عرضانية سميكة. فمثلاً، جرى الصبّ الهلامي لقرص شفرات محرّك عنفي مكوّن من قطعة واحدة قطره يساوي 40.64 سم (في الحالة الغضّة) باستخدام $Si_3N_4$.

والخطوة التالية هي أتمتة السيرورة. لقد طُوِّرت السيرورة المؤتمتة لصنع دولاب عنفي يمثِّل مكوِّناً مرشَّحاً للاستخدام في الطائرات النفاثة الصغيرة. يبيِّن الشكل 12 ـ 31 هذه القطعة المثال، أما الشكل 12 ـ 32 فيُبيّن سيرورة الصبّ الهلامي المؤتمتة.

لقد تمت أتمتة جميع الخطوات باستثناء إزالة القطعة من آلة التشكيل ونقلها إلى حجرة التجفيف. يتضمّن النظام تصميماً نسائقياً مع سير لنقل القوالب بين المحطات المتخصّصة المختلفة. يسمح التصميم النسائقي بإضافة محطات بسهولة لزيادة الإنتاجية. ومن مزايا هذا التصميم أيضاً هو إمكان برمجة كل محطة على حدة لتعمل كوحدة مستقلة عن المحطات الأخرى. حينئذٍ، إذا توقفت محطة بسبب مشاكل فيها، أمكن الحفاظ على مستوى الإنتاج في المحطات الأخرى.

يتكوَّن هذا النظام المؤتمت المغلق الحلقة من ثماني محطات معالجة مع نظامي نقل على سير، في الأعلى والأسفل، متصلين معاً بواسطة مصعدين. يُربط القالب بمنصة ويُنقل على السير إلى كل محطة معالجة. ثمة ثماني محطات: تحرير القالب، تجميع القالب، ملء القالب، تسخين القالب، تفكيك القالب، إخراج القطعة، غسيل وتجفيف القالب. وكل محطة مزوَّدة بنظام تحكّم منطقي قابل للبرمجة متكامل معها. وتُنفَّذ مهام الآلة بواسطة تجهيزات تتحرك كهربائياً أو بضغط الهواء. ولتسخين القالب (بغية تقليص مدة التهلُّم)، اختير سخَّان يعمل بالأشعّة تحت الحمراء لأنه يوفِّر تحكّماً ممتازاً في درجة

الحرارة، ويمكن تغيير حجمه ليتوافق مع حجم القالب، إضافة إلى عمره المديد وخرجه الكبير.



**الشكل 12 ـ 32: نظام صب هلامي مؤتمت لصنع مكوِّنات سيراميكية[78].**

## تطبيقات الصبّ الهلامي

استُخدم الصبّ الهلامي[78] لتطوير مساحيق أو قِطَع لتطبيقات السيارات. على سبيل المثال، يُستخدم الصبّ الهلامي لصنع قِطَع سيارات من فوسفات الصوديوم والزركونيوم.

واستُقصي استخدام الصبّ الهلامي أيضاً للمواد الإلكترونية. فقد بيَّن الباحثون لدى مختبرات أوك ريدج (Oak Ridge) الوطنية التابعة لوزارة الطاقة الأميركية أن قطع تيتانات وزركونات الرصاص المصنوعة باستخدام معلقّ مائي طيني القوام تتصف بخواص تضاهي تلك التي للمواد المصنوعة بالتشكيل بالكبس، وأفضل من تلك التي للمواد المصنوعة بالصب الشريطي (Tape Cast). ويحصل حرق الرابط من قطع تيتانات وزركونات الرصاص بنفس المعدّل الذي يحصل فيه في حالة القطع المشكَّلة بالكبس. واستخدم الباحثون

الصينيون الصبّ الهلامي لصنع سيراميكات مسامية ذات بنية كبنية أُكسيد الكالسيوم تيتانيوم $CaTiO_3$، وقطع معقّدة من الـ $Al_2O_3$.

وثمة تطبيقات أخرى غير تطبيقات السيارات في قيد التطوير. فالباحثون لدى مختبرات أوك ريدج يطوِّرون سيرورة صبّ هلامي لصنع مغانط دائرية، تزيد أقطارها على 50 سم، من الفرِّيت لمسرِّع فيزيائي عالي الطاقة.

ويتعاون آخرون[78] مع مجموعة أوك ريدج لصنع قطع معقّدة الأشكال من كربيد السليكون لمعالجة ماء صناعة أنصاف النواقل. وثمة تطبيق آخر في قيد الاستقصاء هو استخدام الصبّ الهلامي لصنع عظم صناعي. وتستقصي مجموعة أوك ريدج أيضاً الإعداد السريع للنماذج الأولية باستخدام الصبّ الهلامي.

في الواقع، لا حصر للاستخدامات الممكنة للصبّ الهلامي. فخلال العقد الماضي، ظهر الصبّ الهلامي بوصفه تقانة إنتاج عملية للسيراميكات العالية الجودة. ومن المؤكد أن التحسينات المستقبلية ستوفّر قوة الدفع اللازمة لوضع الصبّ الهلامي في مقدمة تقانات التشكيل[79].

## الصب الروبوتي

طوَّر جوزيف سيزيرانو (Joseph Ceserano) لدى مختبرات سانديا الوطنية[80] مفهوماً يقوم على استخدام روبوت متحكَّم فيه حاسوبياً لتوضيع حقنة من معلّقات سيراميكية طينية القوام ومزيجاً من مسحوق سيراميكي وماء ومقادير قليلة من معدِّلات كيميائية. وتُوضَّع هذه المادة على شكل طبقات رقيقة متتالية على ركيزة ساخنة.

يُستخدم في هذه التقنية روبوت لعصر المعلّق من الحاقنة كي يسير وفق أنماط محدّدة سابقاً بواسطة البرمجيات الحاسوبية. تسمح التقنية بتشكيل قطعة سيراميك كثيفة تشكيلاً حراً وتجفيفها وشيِّها في أقل من 24 ساعة، وهذا ما يمكِّن من الإعداد السريع للنماذج الأولية.

لقد كان من الصعب تكوين معلّقات سيراميكية تحتوي فعلياً على مادة صلبة أكثر من السائلة مع اتصافها بالتماسك والانسياب الشبيهين بتماسك وانسياب السائل. يقول سيزيرانو: «بفهم علم الغرويات واستخدام كيمياء سطح المسحوق، صنعنا معلّقات سيراميكية تحتوي على 85 في المئة من مسحوق السيراميك و15 في المئة من الماء. فنسبة المادة الصلبة العالية تخفِّض مدة التجفيف وتقلّص الحجم». خلال 10 ـ 15 ثانية من انتهاء التوضيع، يجب أن يجف المعلّق من الحالة المشابهة للسائل إلى حالة صلبة للتمكين من توضيع الطبقة التالية. إذا كان الطين سائلاً جداً، فإن التوضيعات سوف تظهر على شكل قطرات سائلة تنتشر عشوائياً. لكن بالتحكُّم الملائم، تأخذ كل قطرة شكل مقطع عرضاني مربع مع جدران مستقيمة نسبياً ونهايات علوية مسطّحة، وهذا أساس جيد لتوضيع مزيد من الطبقات عليه. وبعد تشكيل القطعة وتجفيفها، يكثِّف الشَيّ في فرن عالي درجة الحرارة جُسيْمات القطعة.

إلى جانب مزايا التشغيل المحدود من دون استخدام القوالب، يمكن لهذه التقنية توضيع أكثر من مادة واحدة في الوقت نفسه. يمكن تدريج المواد، مثلاً، بالانتقال من السيراميك إلى المعدن ضمن القطعة نفسها من دون إحداث أذى بنيوي فيها.

تستغرق القطعة السيراميكية عادةً أسبوعاً للانتقال من التصميم حتى تصبح منتَجاً نهائياً. على سبيل المثال، تتطلب طريقة الكبس

الجاف المعهودة أن يُرصَّ مسحوق السيراميك على شكل كتل. ولصنع قطعة معقّدة، يجب نحت الكتلة لتأخذ شكلها النهائي بواسطة آلات مُكلِفة. لذا يجري إعداد نموذج أولي لقطعة سيراميكية بالتقنية الجديدة لاستخدامها في صنع ألياف ضوئية لتطبيقات انعراج الأشعّة السينية(80).

## الإعداد السريع للنماذج الأولية

لقد غدا الإعداد السريع للنماذج الأولية (Rapid Prototyping) أو للقِطَع النهائية مباشرةً من ملف حاسوبي (نمذجة أولية سريعة وتصنيع سريع) تقنية على درجة متزايدة من الأهمية لصنع قطع دقيقة. فبدلاً من صنع القوالب، وهي سيرورة تستغرق غالباً أسابيع أو أشهر، فإن طريقة إعداد النماذج السريع تصنع القطعة بتشكيلها نقطة تلو أخرى في طبقات من مسحوق. وتُجفَّف الطبقات المشكَّلة بالتسخين، وتُراكم واحدة فوق أخرى حتى الحصول على القطعة المطلوبة. وتُستخدم في ذلك مواد من قبيل البوليمرات والسيراميكات والفولاذ والألمنيوم.

في حالة الألمنيوم، تُصنع القطعة من مسحوق ألمنيوم وبوليمر باستخدام تقنية النمذجة السريعة. ثم يُحرق البوليمر ويُصهر المعدن قليلاً أو يلبَّد لتكوين القطعة الصلبة. لكن حين انصهار الهيكل المعدني، يتغير شكله قليلاً، وهذا ما يجعل الحفاظ على دقة الشكل أو صنع أشكال معقّدة مستحيلين.

وفي السنوات الأخيرة، مكَّنت طريقة جديدة لتسريب السائل من النمذجة السريعة العالية الدقة للقطع المعدنية. في عملية التسريب هذه، يُطلى هيكل ملبد بمعدن مصهور طلياً خفيفاً، ثم يُكثَّف المعدن ليعطي القطعة النهائية.

تبتدئ سيرورة النمذجة السريعة هذه بمزيج من مساحيق الألمنيوم والمغنيزيوم والنايلون. ويُبلمِر ليزر يقوده حاسوب شكلاً في طبقة من المسحوق، وتُوضَّع الطبقات واحدة تلو أخرى إلى أن تكتمل القطعة. حتى هذه النقطة، تكون نسبة المعدن في القطعة نحو 50 في المئةح.

تكمن صعوبة تشكيل قطع ألمنيوم بالتسريب في أن الألمنيوم يُشكِّل في الهواء بسرعة طبقة أُكسيد تمنع جُسيْماته من الالتصاق معاً. ولمنع تكوُّن طبقة الأُكسيد هذه، سُخِّنت القطعة حتى 540 مْ في جو من النيتروجين المتدفّق، واستُخدم المغنيزيوم في المسحوق للتخلص من الأُكسجين. ونتج عن هذه السيرورة طبقة AlN سمحت لجُسيْمات الألمنيوم بالترابط معاً لتكوين هيكل بحيث يمكن بعدئذٍ تسريبه من دون تشوُّه.

وبعد التحضير الأولي، سُخِّنت القطعة حتى 570 مْ مدة ست ساعات جرى خلالها تسريب المعدن السائل ضمنها. كي تعمل هذه الطريقة بنجاح، يجب أن تكون درجة حرارة الصُهارة السائلة أعلى من درجة حرارة تشكيل الهيكل، لكن أقل من درجة حرارة انصهاره. وخليطة من الألمنيوم والسليكون والمغنيزيوم تمتلك هذه الخواص.

يمكن لهذه الطريقة أن تُعطي قطعاً معقّدة ذات سمات دقيقة تصل بصغرها حتى 500 ميكرون. ونظرياً، يمكنها أن تُعطي قطعاً لها أي حجم. وتساوي مقاومة شدّ هذه القطع ومطاوعتها نحو 80 في المئة من تلك التي تنتُج بصب الألمنيوم[(1)].

لقد فعل مصنِّعو تجهيزات النمذجة السريعة حسناً بإعلان القيم والموسّطات الخاصة بالقطع المصنوعة بواسطة آلاتهم. بعد الحصول على نموذج سريع لقطعة كنت قد صمَّمتَها، لا تمر إلا ثوان قليلة

حتى تعرف بأن مقاسها وشكلها صحيحان. إن معاينة القطعة تدلك مباشرة على ما يجب فعله في الخطوة التالية.

ويمكن تجميع القطع المصنوعة بالنمذجة السريعة لتكوين منتَجات شبه كاملة أيضاً. إن هذه الإمكانية غير المعروفة متوافرة في تجهيزات نمذجة سريعة تبني عدة قطع لدائنية موصولة معاً تقارب مقاومتها للشدّ تلك التي للّدائن الإنتاجية[83][82]. يمكن صنع قطع ثلاثية الأبعاد معقّدة الأشكال بأبعاد تصل حتى 20.3 × 20.3 × 25.4 سم$^3$ على شكل قطع منفصلة من بوليمر يتصلَّد عند درجة حرارة الغرفة، بقليل من التكلفة المالية والزمنية.

إن المزيتين الرئيستين لسيرورة النمذجة السريعة هذه مقارنةً بسيرورات النمذجة السريعة الأخرى هما السرعة والتكلفة المنخفضة. فليست ثمة حاجة إلى رسومات ورقية تُرسل إلى الورشة لإجراء التصنيع، وهذا يلغي التأخير الناجم عن وجود العمل الورقي وما يرافقه من أعمال تنظيمية. ما يحصل هو أن قوالب المكوِّنات المرغوب فيها تُصنع آلياً بواسطة آلة يقودها نظام تصميم بمساعدة الحاسوب، ويمكن للآلة تلك أن تكون في مكتب المهندسين.

تتمحور هذه السيرورة حول آلة نمذجة سريعة متوافقة مع جو المكتب. هذه الآلة هي من حيث المبدأ طابعة ثلاثية الأبعاد تبني القطعة مباشرة من بيانات تصميم بمساعدة الحاسوب تحدِّد نموذجاً رياضياً صلباً، تماماً على غرار آلة النمذجة السريعة للطباعة الضوئية الفراغية أو آلة نمذجة التوضيع الاندماجي. يقوم شخص بتحميل ملف البيانات الناجمة عن التصميم بمساعدة الحاسوب وتلقيمه في الآلة (تستغرق هذه العملية دقيقة واحدة للقطعة)، ثم تَصنع الآلة القطعة. يمكن أن يستغرق صنع القطعة بضع ساعات حتى 30 ساعة، تبعاً لحجمها.

تبني الآلة القطع بتفاصيل دقيقة عادةً، لكن مع عيبين كبيرين. **أولهما** أنها تصنع القطع من شمع يفتقر إلى المقاومة والمتانة. **وثانيهما** هو أن السطوح المتجهة نحو الأسفل تُغطى بحوامل. يمكن تنظيف هذه الحوامل بسهولة بفرشاة يدوية بسيطة، لكن السطوح الناتجة لا تكون ناعمة.

أما سيرورة النمذجة السريعة الحالية، فتخلو من هذين العيبين. وأما خطواتها فهي الآتية:

**1** ـ تُصمَّم القطعة المطلوبة بمساعدة الحاسوب.

**2** ـ بالاستفادة من طريقة طرح النموذج الصلب (Solid-Modeling Subtraction)، يُصمِّم الحاسوب قالباً يحتوي على فجوة لها شكل وحجم القطعة المصمَّمة.

**3** ـ يُشرَّح نموذج القالب إلى قطع ملائمة لإلغاء السطوح المتجهة نحو الأسفل (لدرء تكوين الحوامل على سطوح القطعة المقولبة).

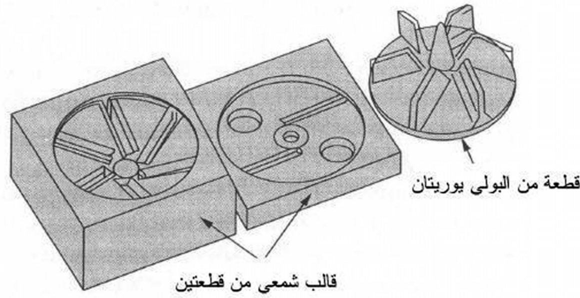
**4** ـ تُضاف منافذ ومجاري التعبئة إلى النموذج الحاسوبي لاستكمال تصميم القالب.

**5** ـ تُرسَل بيانات التصميم بمساعدة الحاسوب الخاصة بقِطَع القالب إلى آلة صنع النماذج السريعة، وتبني الآلة قِطَع القالب.

**6** ـ تُلصق قطع القالب معاً ويُملأ القالب ببوليمر يتصلَّد عند درجة حرارة الغرفة. البوليمر الذي استخدمه مطوِّر هذه الطريقة هو البولي يوريتان مديد العمر يتصلَّد خلال نحو نصف ساعة بقدر يكفي لإخراجه من القالب.

**7** ـ يُذاب القالب وتُزال الزوائد الطفيفة من القطعة لتصبح جاهزة للاستخدام.

إحدى فوائد استخدام الشمع مادة للقالب هي أنه يمكن صهر القالب عن القطعة (درجة حرارة انصهار الشمع أقل من درجة حرارة البولي يوريتان). طبعاً، إذا كانت ثمة حاجة إلى صنع عدة نسخ من القطعة، وجب صنع عدد مماثل من القوالب الشمعية باستخدام بيانات التصميم بمساعدة الحاسوب (انظر الشكل 12 ـ 33)[84].




**الشكل 12 ـ 33: قالب من قطعتين يُستخدم لصنع قطعة معقدة ثلاثية الأبعاد[84].**

من الواضح أن الطريق طويلة أمام البحث في مواد مركَّبة، متباينة الخواص ومتدرّجة التركيب الوظيفي، لاستخدامها في النمذجة السريعة المتعدّدة المواد. إن اهتمام التقانات المتقدمة بهذه المواد، وبسيرورة النمذجة السريعة واضح، وتدل المؤشرات على أنها يمكن أن تتطوّر لتصبح فرعاً جديداً كلياً من فروع التصنيع. ومما لا ريب فيه هو أنه سوف تظهر عوائق خلال مسيرة تطوّرها، إلا أنها سوف تتجاوزها على أيدي مهندسين ذوي كفاءات مماثلة لكفاءات أولئك الذين يعملون بلا كلل في النمذجة السريعة[91][85].

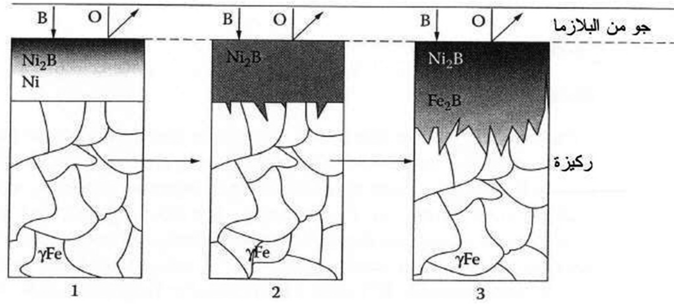
## البوردة بمساعدة البلازما

البوردة (Boriding) هي معالجة حرارية كيميائية ذات تاريخ طويل، وقد بدأ استخدامها في الصناعة في عام 1955 تقريباً. من

المعروف، من خلال المنشورات الروسية، أن عُمر أجزاء من المضخّات المستخدمة في التنقيب عن النفط (التي عولجت بحمّام ملح البوريد) قد تضاعفت بمقدار أربع مرات مقارنةً بتلك التي عولجت بالتقسية الغلافية (Case hardening) أو التقسية التحريضية[92] Induction hardening. إلا أن البوردة لم تنتشر على نطاق واسع إلا بعد تطوير البورَدة برصّ المسحوق في أواخر ستينيات القرن العشرين[93][94]. وبرغم الجهود الكثيرة التي بُذلت منذئذ لتطوير سيرورة بوردة أعلى كفاءة انطلاقاً من الطَور الغازي، لم يظهر لها حتى الآن تطبيق صناعي معروف، ويُعزى هذا إلى المواد الأولية التي اختيرت لها، وبالتحديد ثنائي البوران $B_2H_6$ الشديد الانفجار والسمية[95]، وهاليدات البورون $BCl_3$ و$BF_3$. وإضافة إلى كون هاليدات البورون شديدة السمية، فإنها تعزِّز التآكل بتكوين الـ HCl والـ HF. لكن في الآونة الأخيرة، استُخدمت ثلاثي ميثيل البورات $B(OCH_3)_3$ بوصفها بديلاً آمناً للمواد الأولية تلك[96]. وقد أُثبت أنه باستخدام ثلاثي ميثيل البورات، يمكن تكوين طبقات $Fe_2B$ بمساعدة البلازما. إلا أن طبقات البورون ليست كثيفة تماماً، بل تتصف ببنية مسامية. والمسؤول عن ذلك هو الأُكسجين الموجود في ثلاثي ميثيل البورات.

ما يمكن استنتاجه هو أنه حين بَوْرَدة فولاذ مطلي بالنيكل، تتكوَّن طبقة متعدّدة الأطوار. وعندما يكون طلاء النيكل الأولي سميكاً جداً، يمكن لنظام الطبقات الناتجة أن يحتوي على طبقة Ni-Fe طرية نسبياً بين طبقتي بوريد صلبتين، وهذا ما يجب تجنّبه عموماً لأغراض تتصل بمقاومة الاهتراء. فالمفضَّل هو طبقة متعدّدة الأطوار تتكوَّن عندما يكون طلاء النيكل الأولي رقيقا بقدر كافٍ. حينئذٍ تكون الطبقة الخارجية (التي تحتوي على النيكل والحديد) طرية، وتكون طبقة البوريد التي تحتها صلبة.

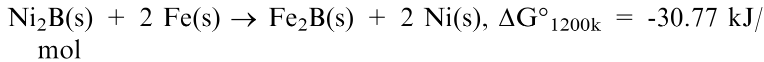
تُماثِل آلية تكوين البوريد حين بَوْرَدة الفولاذ المطلي بالنيكل إلى حد بعيد الخطوات الثلاث المبينة في الشكل 12 ـ 34، وهي:




**الشكل 12 ـ 34: أكثر آلية احتمالا لتكوين البوريد في أثناء بوردة فولاذ مطلي بالنيكل. يشير اللون الرمادي إلى تدرُّج البورون ضمن الطبقة.**

1 ـ يتكوَّن الـ $Ni_2B$ على السطح وينمو باتجاه النواة.

2 ـ عند الملتقى بين $Ni_2B$ وبوريد النيكل والحديد، يتحوَّل بوريد النيكل $Ni_2B$ إلى بوريد الحديد $Fe_2B$ الأشدّ استقراراً من الناحية الترموديناميكية وفقاً للتفاعل:



$$Ni_2B(s) + 2\,Fe(s) \rightarrow Fe_2B(s) + 2\,Ni(s),\ \Delta G^\circ_{1200k} = -30.77\ kJ/mol$$

حيث s تعني صلب Solid و$\Delta G^\circ$ هو تابع جيبس أو الأنتالبية الحرة في الشروط النظامية.

3 ـ مع مضي الوقت، يبدأ البورون بالتغلغل عبر السطح، ومن ثَمَّ تنمو طبقة البوريد.

يُعتبر طلاء النيكل على درجة كبيرة من الأهمية حين بَوْرَدة الفولاذ بثلاثي ميثيل البورات لأنه يقوم بمنع تغلغل الأُكسجين. ما

يفعله طلاء النيكل عملياً هو عزل جو البلازما المحتوية على الأُكسجين عن الموقع الذي يتكوَّن فيه بوريد الحديد، ولذا لا يستطيع الأُكسجين التداخل معه. مقارنةً بالنتائج المعروضة في المرجع[96]، تتصف طبقة البوريد الناتجة هنا بكونها كثيفة وخالية من المسامات.

هذه أول مرة ينجح فيها تكوين طبقات البوريد الكثيفة على ركيزة فولاذية في سيرورة بَوْرَدة بمساعدة البلازما وباستخدام ثلاثي ميثيل البورات، وذلك بتوضيع طبقة رقيقة من النيكل النقي على الركائز الفولاذية قبل بَوْرَدَتها. ويمكن توضيع طلاء النيكل إما بسيرورة توضيع البخار فيزيائياً أو بالطلي الكهربائي. ولتكوين طبقة بوريد سميكة (للتطبيقات التي تتطلب مقاومة اهتراء)، يجب إيلاء عناية كبيرة إلى سماكة طلاء النيكل الأولي. لقد تحقَّقت أفضل النتائج بطلاء نيكل تبلغ سماكته 2 ميكرون تقريباً. وكانت سماكة طبقة البوريد العظمى حينئذٍ 160 ميكرون، تبعاً لمدة البَوْرَدة. وكانت طبقات البوريد من النوعين $(Ni, Fe)_2B$ و$Fe_2B$. ووصل عدد يكرز لقساوة طبقة البوريد إلى 2150[97].

## تعدين المسحوق ذو الأشكال النهائية

لقد أثار تعدين المسحوق ذو الأشكال النهائية (Net- Shape Powder Metallurgy) الباحثين في المجال الجوي الفضائي والصناعي طوال أكثر من 40 عاماً، لأنه يلغي عمليات التشغيل الميكانيكي من سيرورات التصنيع، وهذا يؤدّي إلى تخفيض كبير في تكلفة القِطَع المصنَّعة. على سبيل المثال، ترغب مخابر البحث لدى القوى الجوية الأميركية في تطوير مواد وسيرورات، لمكوِّنات مضخّة دوّارة للمحرّكات العنفية، تقلِّص أوزان القطع بـ 35 في المئة، وتخفِّض

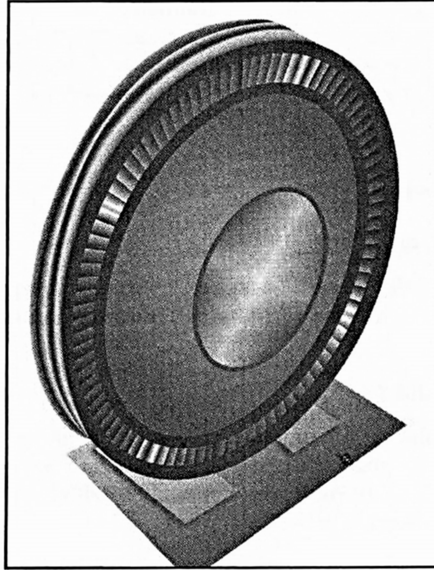
تكلفة الإنتاج الحالية بـ 45 في المئة، وتُخفِّض أيضاً التكاليف المتوقعة لصنع أقراص ذات شفرات نهائية الشكل بأكثر من 40 في المئة.

يُعدُّ تعدين المسحوق ذو الأشكال النهائية طريقة لصبّ مسحوق المعدن الصلب وتصليده في شكل نهائي ليعطي قطعاً ذات بُنى وخواص تضاهي تلك التي تتحقَّق بالتطريق (Forging) عادةً. وتحتفظ هذه الطريقة بمزايا التصميم والمعالجة المتأصلة في سيرورة تعدين المسحوق الأصلية وتحقِّق مزايا الأداء التي يحقِّقها التطريق. يقوم منتجو المحرّكات حالياً بتصنيع قلوب العنفات الدوّارة، المستخدمة في محرّكات الطائرات النفاثة والصواريخ، من أقراص مطرَّقة ذات شفرات مثبتة عليها ميكانيكياً، أو مشغَّلة من سبيكة مطرَّقة. وأحدث طريقة لصنع تلك الأقراص هي تشكيلها من خلائط النيكل الفائقة المعهودة ذات مقاومة الشدّ الكبيرة، ثم طليها لحمايتها بيئياً، أو من خلائط متوسّطة المقاومة، لكن تامة التوافق مع بيئة العمل القاسية. إلا أن عملية الطلي تؤدّي إلى مشاكل تتعلق بالوثوقية والتكلفة، في حين أن الخلائط المتوسطة المقاومة تحدّ من أداء المحرّك العنفي.

يُظهر الشكل 12 ـ 35 قرصاً ذا شفرات عالية المقاومة النوعية للشدّ مصنوعاً باستخدام سيرورة انتقائية لتعدين المسحوق تُعطي أشكالاً نهائية مع طبقة سطحية ملصوقة بالكبس الحار المتساوي الضغط متوافقة مع بيئة العمل القاسية.

في البداية، اكتشف الباحثون تلوّثاً سطحياً وخشونة ميكرويّة في سطوح قِطَع صُنعت بطريقة تعدين المسحوق ذي الأشكال النهائية بالكبس الحار المتساوي الضغط. وكانت تلك العيوب على صلة بتخرُّش المسحوق والترابط التغلغلي مع المادة الطرية للقالب الذي يُتلف بدوره بعد الكبس الحار المتساوي الضغط. لذا استُخدمت الطبقة السطحية الملصوقة بالكبس الحار المتساوي الضغط لحل مشكلة خشونة السطح، ولتوفير فرصة نادرة لحماية الخلائط الفائقة

الجودة من بيئة المحرّك العنفي القاسية جداً على تلك الخلائط عادةً. فالبيئة التي يجب أن تعمل فيها أقراص العنفات تتصف على الأغلب بأنها غازات غنية بالهيدروجين أو الأُكسجين، والغازات الغنية بالهيدروجين تُهشِّش الخلائط الفائقة ذات مقاومة الشدّ الكبيرة، وتلك الغنية بالأُكسجين تحرقها.



**الشكل 12 ـ 35: نموذج لقرص متكامل مع الشفرات مصنوع بسيرورة تعدين المسحوق والكبس الحار المتساوي الضغط.**

في سيرورة الطبقة السطحية الملصوقة بالكبس الحار المتساوي الضغط، يوضِّع الباحثون طبقة من خليطة (تُختار بحيث تكون متوافقة مع بيئة العمل ومع خليطة القرص الأساسية) باستخدام البخ البلازمي بمساعدة التخلية على السطح المشغَّل للقالب المصنوع من الفولاذ المنخفض الكربون. وبعد تجميع القالب وملئه بالمسحوق وتخليته من الغازات وإحكام إغلاقه وتعريضه للكبس الحار المتساوي الضغط،

يتصلَّد مسحوق النواة المكوَّن من خلائط فائقة ويلتصق بواسطة الكبس الحار المتساوي الضغط بسطح الخليطة الخارجي المتوافقة مع بيئة العمل والموضَّعة على القالب المهدور. توفِّر هذه الطبقة الملصوقة بالكبس الحار المتساوي الضغط المديدة العمر توافقاً مع البيئة القاسية، وتحسِّن الإنهاء السطحي في أثناء المعالجة. ويُحسِّن السطح ذو الإنهاء الجيد المقدرة على درء العيوب السطحية التي قد تنجم عن تجهيزات الاختبارات اللاإتلافية.

إن تطوير طرائق تعدين المسحوق لصنع أقراص متكاملة مع الشفرات، مع إضافة خلائط فائقة متوافقة مع البيئات القاسية وذات مقاومة شدّ كبيرة، سوف يُمكِّن من تطوّرات ثورية في مواد وتصاميم العناصر الدوّارة في المضخّات العنفية. وسوف تمكِّن الطريقة المقترحة، لصنع الأقراص المتكاملة مع الشفرات، الصناعة الجوية والفضائية من بناء أقراص باستخدام مواد من خلائط فائقة ذات جودة عالية تقوم على النيكل، تُحقِّق الوثوقية وقابلية الصيانة اللتين تتصف بهما الخلائط الفائقة الحالية المنخفضة المقاومة، إضافةً إلى اكتسابها التوافق مع بيئات عنفات محرّكات الصواريخ الشديدة البرودة.

وسوف يستخدم المهندسون تقانة صنع الأقراص المتكاملة مع الشفرات العالية المردود هذه في المحرّكات العنفية الغنية بالأُكسجين الحالية والمقترحة، ومن ثَمَّ سوف يوسعون استخدامها ليشمل العنفات العالية درجة الحرارة الغنية بالهيدروجين.

## الصب التحريكي

تكوِّن سيرورات الصبّ التحريكي (Rheocasting) بُنى ميكرويّة لاشجرية متساوية الأطوال المحورية ملائمة للتشكيل في الحالة شبه الصلبة مباشرة من خليطة ألمنيوم سائلة.

### الصب في الحالة شبه الصلبة

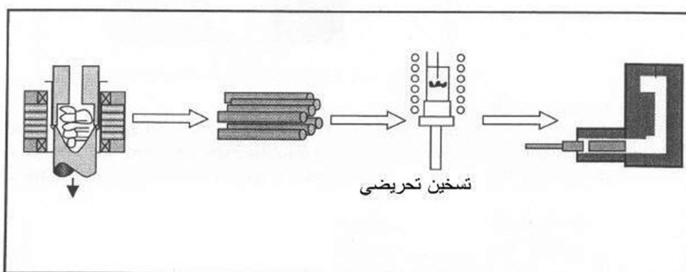
يعني الصبّ في الحالة شبه الصلبة أيَّ سيرورة صبّ تستخدم مادة متصلِّدة جزئياً وذات بنية لاشجرية. ثمة مزايا عدّة تنجم عن صبّ الخلائط التي تتصف بهاتين الخاصتين، منها:

- إمكان الحصول على قِطَع معقّدة عالية الجودة قابلة للمعالجة حرارياً، ذات مسامات أصغرية احتجاز الهواء والتقلُّص، وذلك بسبب الملء المستوي الجبهة للمعدن عند سرعات حقن كبيرة نسبياً، مقارنةً بسيرورات الصبّ الجيدة الأخرى، والتغذّية الجيدة بالمعدن في أثناء التصليد.
- تقليص مدة القولبة بسبب انخفاض محتوى المعدن الحراري.
- ازدياد عمر القالب بسبب انخفاض الصدمة والتعب الحراريين الذي ينجم عن انخفاض درجة حرارة الصبّ.

إن أهم مزايا المعالجة في الحالة شبه الصلبة هي جودة القطعة النهائية وتعقيدها وخواصها[98]. ومع أن هذه المزايا على قدر كبير من الأهمية، فإن المزايا المذكورة آنفاً بخصوص تقليص مدة التصليد وزيادة عمر القالب تُعتبر أشدّ أهمية بالنسبة إلى معظم العاملين في مجال الصبّ. لكن مشاكل التكلفة والمعالجة الموجودة في السيرورات الحالية والسابقة للصبّ في الحالة شبه الصلبة منعت العاملين في الصبّ من تحقيق المزايا الهائلة التي تنجم عن انخفاض التكاليف العملياتية المقترنة بها.

يُصنَّف الصبّ في الحالة شبه الصلبة عادةً في فئتين رئيسيتين: الصبّ في الطَورين السائل والصلب (Thixocasting) والصب التحريكي (Rheocasting). يُقصد بالصب في الطَورين السائل والصلب أيُّ سيرورة تبدأ بخليطة محضرة خصيصاً لهذا الصبّ يُعاد تسخينها قبل الصبّ من درجة حرارة المحيط حتى درجة الحرارة

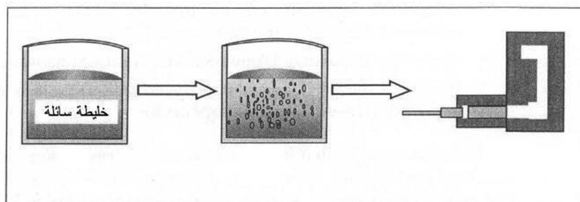
المطلوبة للتشكيل في الحالة شبه الصلبة (الشكل 12 ـ 36). أما الصبّ التحريكي فيُقصد به أيُّ سيرورة تُعدَّل فيها خليطة سائلة لتصبح معلقاً شبه صلب يُشكَّل بعدئذٍ ليُعطي القطعة النهائية (الشكل 12 ـ 37). يُستخدم النوع الأول تجارياً أكثر من الثاني، لكن نموه توقف بسبب تكاليف المواد الأولية الباهظة، وعدم إمكان تدوير زوائد السيرورة في نفس موقع الصبّ. يُعالج الصبّ التحريكي هذه المشكلات باستخدام سبائك خلائط عادية، حيث يمكن تدوير الزوائد واستخدامها ثانية في الصبّ.



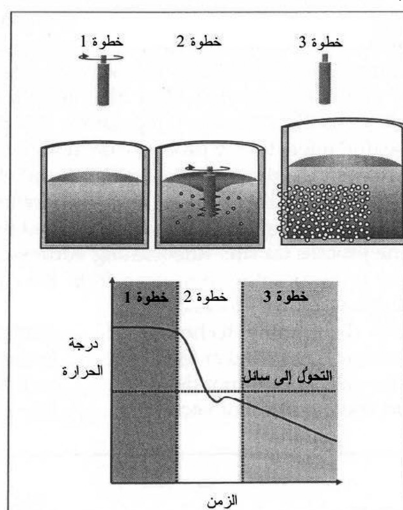

**الشكل 12 ـ 36: سيرورة الصب في الطورين السائل والصلب. تُقطَّع قضبان بأطوال معينة وتُسخَّن لتصبح في حالة شبه صلبة وتُقولب لتشيكل القطعة المطلوبة[99].**

وجرى تطوير تقانة صبّ تحريكي جديدة لدى معهد ماساشوستس للتقانة MIT[99] تُعطي مواد لاشجرية البنية. أدّت تلك التقانة إلى إدراك أن العامل الحاسم في إيجاد ملاط شبه صلب لاشجري البنية هو الجمع بين التبريد السريع والحَمْل الحراري في أثناء تبريد الخليطة من الحالة السائلة، مع عدم حاجة إلى التحريك بعد تكوُّن مقدار صغير جداً من المادة الصلبة. وبغية تحقيق مرونة أكبر للسيرورة، استُخدمت أداة تبريد وتحريك مستقلة لإزالة الحرارة وتحقيق نقل حراري ضمن الخليطة المنصهرة[103][100]. يُظهر الشكل 12 ـ 38 مخطّطاً لهذه السيرورة[104]. إن أهم اكتشاف نجم عن التجارب هو أن التحريك بعد انخفاض درجة

حرارة المعدن إلى ما من دون درجة حرارة التوازن الترموديناميكي سائل ـ صلب ليس له تأثير في البنية الميكرويّة النهائية. تتصف هذه السيرورة التجارية المعروفة بـ $SSR^{TM}$ بمزايا مهمة مقارنةً بسيرورات الصبّ التحريكي الأخرى:




**الشكل 12 ـ 37: سيرورة الصب التحريكي. يُعدَّل ألمنيوم مصهور لتكوين مادة شبه صلبة تُصب بعدئذٍ مباشرة[99].**




**الشكل 12 ـ 38: مخطط توضيحي للسيرورة $SSR^{TM}$. (1) تُبقى الخليطة المصهورة عند درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التحوُّل إلى سائل. (2) ويوضع قضيب بارد دوار في الصهارة ليبتدئ التصليد. (3) يُبعد القضيب الدوار وتبرَّد الصُهارة بعد سكونها حتى درجة حرارة التشكيل المرغوب فيها[104].**

• يجري التحكُّم بإزالة الحرارة والحمل الحراري بأداة تبريد وتحريك مستقلة بدلاً من الاعتماد على طرد الحرارة بالصبّ في وعاء بارد. وهذا يسمح بطيف أوسع من درجات حرارة الصُهارة الواردة ويضمن درجة حرارة ملاط متجانسة بعد عملية التبريد.

• أثناء سيرورة الصبّ التحريكي، تُزال السخونة من المعدن قبل نقله إلى آلة القولبة، وهذا يُقلِّص مدة البقاء ضمن الآلة.

• يحصل التبريد ضمن الصُهارة بواسطة القضيب الدوَّار، وهذا يضمن تبريداً متجانساً للمادة. إن السيرورات الأخرى، التي تعتمد على إزالة السخونة عبر السطح الخارجي لحاوية، أكثر عرضة لتكوين قشرة شجرية البنية بسبب التبريد الموضعي السريع عند السطح.

• يكوِّن التبريد السريع والتحريك، اللذان يقوم بهما القضيب، بُنية ميكرويّة دقيقة جداً لا تتطلب عملية تخشين طويلة لتحقيق حالة حُبَيْبية متجانسة، ويمكن صبّها مباشرة.

لقد أُجري صب تحريكي لعدد من الخلائط والسبائك باستخدام السيرورة SSR مع آلات قولبة بالصبّ أوزانها 800 و1000 طن. واستُخدمت هذه السيرورة لإنتاج ملاط من الخلائط 356 و380 و365 و59-Magsimal™. وأُجري الصبّ بكل من السائل والملاط[105] (انظر الجدول 12 ـ 7).

## الصب بالشمع المهدور

### البلّورات الأحادية

أثناء تطوير المحرّك الذي سوف يدفع طائرات المستقبل النفاثة ذات الـ 500 مقعد، صُنعت بهذه التقانة شفرات أحادية البلّورات لعنفات الضغط العالي، أدَّت إلى أكثر محرّكات توليد الطاقة هدوءاً وأعلاها كفاءة من حيث استهلاك الوقود[106]. وباستخدام ابتكارات

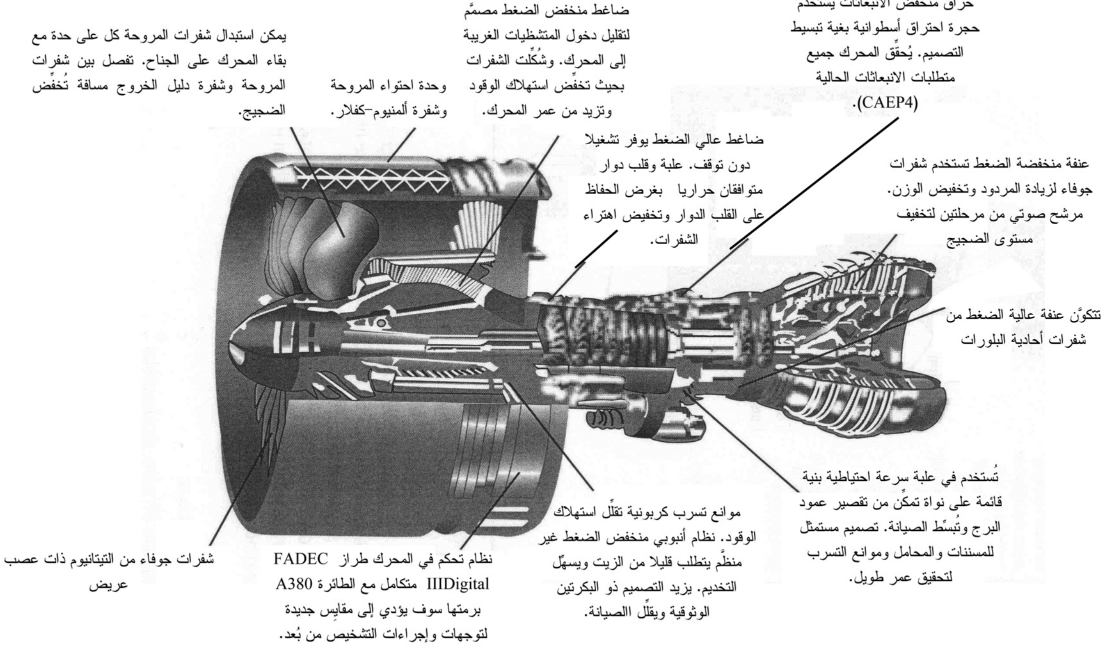
أخرى في المحرّك، فإنه سوف يستهلك أقل من 1.2 غالون من الوقود لكل راكب لقطع مسافة 95 ميلاً، وهذا استهلاك للوقود مكافئ لما تستهلكه أفضل سيارات الديزل الموجودة في الأسواق (انظر الشكل 12 ـ 39).

**الجدول 12 ـ 7**: التركيب الكيميائي لأربع خلائط اختُبرت بالسيرورة $SSR^{TM}$.

| | العنصر | | | | ( في المئةو) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| الخليطة | Si | Mg | Zn | Cu | Fe | Mn | Sr | Ti | أخرى |
| 380 | 7.80 | 0.04 | 2.73 | 3.18 | 0.85 | 0.25 | | 0.10 | 0.25 |
| 365 | 11.19 | 0.17 | | | 0.11 | 0.62 | 0.0167 | 0.05 | |
| Magsimal TM | 2.27 | 5.60 | 0.006 | 0.005 | 0.134 | 0.688 | | 0.13 | |
| 356 | 6.96 | 0.10 | 0.01 | 0.65 | 0.32 | 0.01 | 0.06 | 0.0139 | |

( في المئةو): نسبة مئوية وزنية

تَمثَّل الحل الأول لتكوين بضع حُبيْبات، ثم تركها تنمو أو تتشكَّل على طول الشفرة، بسيرورة تسمّى التصليد الاتجاهي[106] (Directional Solidification) أما مفتاح التصليد الاتجاهي فهو تبريد المعدن المصهور في القالب في اتجاه واحد، والحفاظ على تدرُّج حراري متجانس في مقدمة جبهة التصليد، ومنع تكوُّن حُبيْبات جديدة. يبدأ التصليد فوراً ويستمر إلى أن يصبح المعدن صلباً. وتوجد في قوالب التصليد الاتجاهي فتحات في الأسفل، إضافة إلى مكان يسمّى البادئ. يوضع القالب على صفيحة نحاسية تُبرَّد بالماء في أثناء تسخينه حتى درجة انصهار الخليطة ضمن الفرن. ويصطدم المعدن بصفيحة التبريد فيتصلَّد مع نمو للحُبيْبات في اتجاه واحد. ويبقى في تلك الأثناء المعدن المتبقّي في القالب مصهوراً. ويُسحب القالب وصفيحة التبريد بهدوء من الفرن عبر حاجز إشعاع. وهذا يولِّد تدرُّجاً حرارياً على طول المحور الشاقولي. ويسبب التدرُّج الحراري نمو الحُبيْبات شاقولياً على نحو أشدّ من نموّها في أي اتجاه آخر.

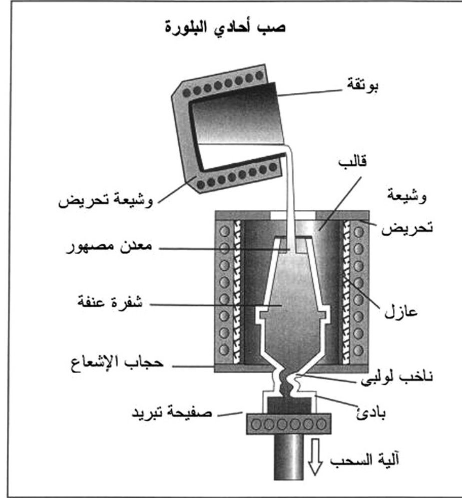



**الشكل 12 ـ 39: أكثر المحرّكات النفاثة كفاءةً ونظافة.**

تفتقر شفرات التصليد الاتجاهي إلى حدود الحُبيْبات المستعرضة لاتجاه الإجهادات العملياتية، وهذا يزيد من مقاومة الشدّ والمطاوعة. وهي تتصف أيضاً بمعامل مرونة أصغر في ذلك الاتجاه، وهذه خاصية تحسِّن خواص التعب الحراري. يمكن أيضاً أن تكون للمصبوبات بالتصليد الاتجاهي جدران أرقّ من تلك التي تنتُج في المصبوبات ذات الحُبيْبات العشوائية. في حالة الاتجاهات الحُبيْبية العشوائية، يتزايد احتمال انتشار الحدود الحُبيْبية كلياً في المقاطع العرضانية مع التضيُّق المتدرّج لتلك المقاطع.

وللحصول على شفرات أقوى من ذلك، عدَّل المصنِّعون سيرورة التصليد الاتجاهي لتكوين شفرات أحادية البلّورات. تُصنع الشفرة برمّتها من بلورة واحدة مع حدود حُبيْبية. ولجعل بلورة أحادية تنمو في المعدن المصهور، يُحشَر ناخب لولَبي بين البادئ وفجوة الشفرة. يأخذ الناخب بلّورات تنمو شاقولياً ويُرشِّحها إلى أن تظهر بلورة أحادية فقط. وتمضي تلك البلّورة للنموّ عبر بقية المصبوبة (انظر الشكل 12 ـ 40).

ونظراً إلى انعدام الحدود الحُبيْبية في الشفرات الأحادية البلّورة، ليست ثمة حاجة إلى مادة خالطة لتقوية الحدود الحُبيْبية. إن معظم الخلائط الفائقة الأخرى، ومنها المستخدمة في الشفرات الاتجاهية التصليد، تحتوي على الكربون والزركونيوم والبورون والهافنيوم لجعل الحدود الحُبيْبية أقوى، لكنها تخفِّض درجة حرارة الانصهار أيضاً. لذا كانت درجة حرارة انصهار الخلائط التي طُوِّرت للشفرات الأحادية البلّورة أعلى بـ 18 مْ من تلك التي لخلائط التصليد الاتجاهي. وهذا ما يجعلها أفضل تلاؤماً مع درجات الحرارة العالية لمدخل العنفة في المحرّكات النفّاثة الحديثة[106][107].




لتشكيل شفرات عنفية أحادية البلورات، يُسكب معدن مصهور في قالب مسخَّن حتى درجة حرارة انصهار المعدن. ويبدأ التصلُّد عند صفيحة التبريد الموجودة عند قاعدة البادئ. يُرغم السحب البطيء للقالب من الفرن والتحكُّم في التدرُّج الحراري البلورات على النمو شاقوليا. ويوفِّر ناخب لولبي مزيدا من ترشيح نمو الحُبيْبات حتى انبثاق حُبيْبة أحادية البلورة لتنمو عبر بقية القالب.

**الشكل 12 ـ 40**: الصب الأحادي البلورة.

## السيراميكات الأحادية البلّورة

تُنمَّى السيراميكات الأحادية البلّورة (Single Crystal Ceramics)، التي تضم الأكاسيد والفلوريدات والكبريتيدات والكربيدات، عموماً من بذرّة بلّورية في بيئة مصهورة أو غازية. وأكثر التقنيات انتشاراً للتنمية البذريّة من طَور سائل هي اندماج الشعلة (Flame Fusion)، وطريقة تشوخرالسكي (Czochralski)، وطريقة المبادل الحراري، والتنمية الحادة الحافة بتغذّية الغشاء[108] (Edge-Defined Film-Fed Growth). وتتصف المواد الناتجة بمستويات استثنائية عالية من الكمال والنقاء، وهي شديدة الأهمية لكثير من التطبيقات البصرية وليزرات الحالة الصلبة ومكوِّنات التصوير الطبي والطنانات الصوتية.

## تطبيقات سيراميكات البلّورات الأحادية

### النافذة الضوئية

البلّورتان الأحاديتان الشائعتان في هذا المجال هما الياقوت الأزرق $Al_2O_3$ وفلوريد الكالسيوم $CaF_2$. لقد استُخدم الياقوت الأزرق، المنمَّى بطريقة فرنويّ (Verneuil)، طويلاً غطاءً زجاجياً لساعات اليد المقاومة للخدش. ويُستخدم الياقوت الأزرق على نطاق واسع في نوافذ الضوء المرئي والأشعّة تحت الحمراء عند درجات الحرارة العالية. واستُخدم أيضاً قبةً لرأس صاروخ موجَّه بالأشعّة تحت الحمراء.

وثمة اهتمام متزايد باستخدام الياقوت الأزرق في نوافذ مواسح الرمّاز القضباني (Bar Code) الذي يُعرِّف السلع الاستهلاكية. وقد شهدت متاجر عدة كبرى إنتاجية متزايدة وصيانة متناقصة باستخدام نوافذ الياقوت الأزرق المقاومة للخدش. إن الصفائح المنتَجة بطريقة التنمية الحادة الحافة بتغذّية الغشاء ملائمة جداً لهذا التطبيق.

أما بلّورات فلوريد الكالسيوم، التي استُخدمت طويلاً في بصريات محلِّل الطيف، فتشق طريقها نحو سوق رئيسة جديدة في صناعة أنصاف النواقل. فالخواص البصرية الاستثنائية لفلوريد الكالسيوم عند طولي الموجة 193 و157 نم جعلت منها المادة المفضلة لنظم الطباعة الضوئية الميكرويّة في مجال الأشعّة فوق البنفسجية البعيدة للجيل القادم من الإلكترونيات الميكرويّة.

### الليزرات

تُستخدم في ليزرات الحالة الصلبة قضبان أو شرائح أحادية البلّورة من مادة شفافة مشوبة بعناصر ذات فوارق بين مستويات طاقة الإلكترون ملائمة لتوليد ضوء ليزري بالكفاءة المطلوبة وبأطوال

الموجة المرغوب فيها. تتميّز تطبيقات المواد الليزرية السيراميكية تلك بالتنوُّع الشديد، فالياقوت الأزرق المشوب بـ $Cr^{3+}$ (أي الياقوت الأحمر)، على سبيل المثال، الذي يُعطي ضوءاً ليزرياً طول موجته 0.694 ميكرون، يُستخدم في اللحام، وفي إزالة الوشم. لا يؤذي إشعاع الياقوت الأحمر الجلد الطبيعي الموجود تحت الوشم الذي يُزيله.

ومن المواد الأخرى، الياقوت الأزرق المشوب بـ$Ti^{4+}$ الذي يُعطي نبضات ليزرية قصيرة جداً في مجال الفيمتو ثانية يمكن توليف أطوال موجاتها بين 0.65 و1.1 ميكرون. وهذه ليزرات مفيدة في طيف واسع من الاستخدامات المتخصّصة من قبيل التحليل الطيفي الفائق السرعة، والتشغيل الميكروي، والبحث والتطوير في مجال الاندماج النووي. ويُستخدم الياغ (YAG) ($Y_3Al_5O_{12}$) المشوب بـ $Nd^{3+}$، الذي يُعطي ضوءاً ليزرياً طول موجته 1.06 ميكرون، في كثير من التطبيقات، منها اللحام وقياس المسافة وإزالة غباشة عدسة العين. ويُستخدم الألكسندريت (الكريزوبيريل الصناعي)، الذي يُعطي ضوءاً ليزرياً طول موجته يساوي 0.755 ميكرون، في إزالة شعر الجسم غير المرغوب فيه.

**التصوير الطبي**

تُستخدم السيراميكات الأحادية البلّورة ومّاضاتٍ (Scintillators) في تجهيزات التصوير الطبي، ومنها تجهيزات التصوير الطبقي بالإشعاع البوزيتروني والتصوير المقطعي المحوسب بالأشعّة السينية. الومّاضات هي بلّورات تحوّل الإشعاع الوارد إليها (أشعّة غاما، الأشعّة السينية... إلخ) إلى فوتونات تقوم بدورها بتحريض صفيفات كواشف ضوئية لتُعطي صورة يمكن خزنها ومعالجتها حاسوبياً. من أمثلة هذه البلّورات جرمانات البيسموث المستخدمة في التصوير

الطبقي بالإشعاع البوزيتروني، وتنغستات الكادميوم المستخدمة في التصوير المقطعي بالأشعّة السينية.

**الركائز**

يُعدُّ استخدام الياقوت الأزرق، وكربيد السليكون الأحادي البلّورة المطوَّر حديثا، ركائز لتوضيع نيتريد الغاليوم حدثاً لافتاً. فالتقارب الشديد بين موسّطات الشبكة في سطوح ملائمة في الياقوت الأزرق وكربيد السليكون ونيتريد الغاليوم يُسهِّل التوضيع بتنمية البلّورات الطبقية المنتظمة (Epitaxial) لنيتريد الغاليوم (أو نيتريد الغاليوم المشوب). ونيتريد الغاليوم الموضَّع بهذه الطريقة هو أساس الثنائي المشعّ للضوء الأزرق الذي جرى تسويقه أخيراً.

تولِّد الثنائيات الزرقاء المطلية بطلاء فَلْوَري مناسب، أو المتزاوجة مع ثنائيات حمراء وخضراء، ضوءاً أبيضاً. ويتصف منبع الضوء الأبيض نصف الناقل هذا باستهلاك منخفض للطاقة وبعمر مديد. ومع انخفاض تكلفة هذه الثنائيات وازدياد مردودها، سوف تصبح مصدر الإضاءة المفضل على مدى العشرين سنة القادمة، مولِّدةً سوقاً ضخمة لركائز السيراميكات الأحادية البلّورات.

**التطبيقات الأخرى والسوق**

السوق الضخمة الأخرى للسيراميكات الأحادية البلّورة هي الأحجار الكريمة الصناعية. فقد غدت الزركونيا $ZrO_2$ التكعيبية البديل الرئيس للألماس، وتُستخدم بلّورات الكوارتز مهتزاتٍ تتحكَّم في توقيت تدفّق البيانات في كل دارة إلكترونية عملياً، ومنها ساعات اليد الإلكترونية.

وتُستخدم تجهيزات الأمواج الصوتية السطحية في دارات كثيرة. وقد شاع استخدام نيوبات الليثيوم ركائز لتجهيزات الأمواج الصوتية

السطحية. في عام 2001، نمَّت شركة واحدة فقط بمفردها 60 طناً من نيوبات الليثيوم الأحادية البلّورة.

أما قيمة السيراميكات الأحادية البلّورة المستخدمة في التطبيقات المذكورة فتُقدَّر بنحو 125 ـ 200 مليون دولار، وقد يكون هذا التقدير محافظاً جداً. ومع نمو أسواق الإلكترونيات الميكرويّة والتصوير الطبي والجراحة الليزرية والإضاءة بأنصاف النواقل، سوف ينمو أيضاً هذا النوع الرائع من تقانة السيراميكات.

## المعالجة بالأمواج الميكرويّة

### التثقيب

يمكن لمثقب الأمواج الميكرويّة ثقب مواد كالإسمنت والزجاج بصمت ومن دون تكوين غبار. بتسخين المادة حتى 2000 مْ تقريباً بالأمواج الميكرويّة، تصبح طرية بقدر كاف لدفع قضيب صغير عبرها.

تمثِّل هذه الطريقة حلاًّ رخيصاً لتطبيقات متنوعة[109]. فبواسطتها يمكن فتح ثقوب تقع أقطارها بين 1 ملم و1 سم، ويمكن استخدامها مثلا في إنتاج مكوِّنات سيراميكية للسيارات والطائرات، وفي أعمال البناء والهندسة الجيولوجية.

ليس استخدام التسخين وسيلة للقصّ والتثقيب بجديد. فالليزرات مستخدمة فعلاً لفتح شقوق وثقوب بمقاسات من رتبة الميكرونات. إلا أن التثقيب الليزري باهظ التكلفة بالنسبة إلى كثير من الأعمال الهندسية اليومية، في حين أن مثقب الأمواج الميكرويّة ليس أغلى من المثقب الميكانيكي إلا قليلاً. أما ريشة مثقب الأمواج الميكرويّة فهي هوائي على شكل إبرة تشع أمواجاً ميكرويّة شديدة

الكثافة. وتولِّد هذه الأمواج بقعة ساخنة حول الريشة، فتنصهر المادة أو تصبح طرية، وهذا ما يمكِّن من دفع الريشة عبرها.

إلا أن مثقب الأمواج الميكرويّة لا يستطيع تثقيب أي شيء على نحو جيد. فدرجة حرارة انصهار الياقوت الأزرق مثلاً عالية جداً. وينقل الفولاذ الحرارة جيداً معيقاً تكوُّن بقعة ساخنة. لكن هذا المثقب يعمل جيداً في ثقب الصخور والإسمنت. وفي الواقع، يمكن للتسخين أن يقوِّي جدران الثقوب في السيراميكات بِلَحم حُبيْبات المادة الدقيقة معاً.

حين استخدام مثقب الأمواج الميكرويّة، يجب حماية العمال من الإشعاع الميكروي الكثيف الذي يولِّده. ويمكن تحقيق ذلك بوضع لوح تحجيب كهرومغنطيسي بسيط أمام ريشة المثقب، وهذا كافٍ لتلبية معايير السلامة المعتمَدة[110].

## الصب والتلبيد

بيَّن أغراوال[111] (Agrawal) وزملاؤه أن رشقة من الأمواج الميكرويّة تطبخ معدناً مسحوقاً محوِّلة إياه إلى جسم معدني صلب. فبملء القوالب بمساحيق معدنية ومعالجتها بجرعة من الأمواج الميكرويّة، تمكَّنوا من إنتاج قطع معدنية مصبوبة من دون الحاجة إلى الصهر والسكب المعهودين.

ليس استخدام الأمواج الميكرويّة لمعالجة المواد جديداً، إلا أنه لم يكن في السابق ممكناً في معالجة المعادن. من الشائع تحويل المساحيق السيراميكية إلى أجسام صلبة باستخدام طاقة الأمواج الميكرويّة التي تسخِّن الحُبيْبات جاعلة إياها تلتحم معاً في سيرورة تسمّى «التلبيد». وبرغم اقتران السيراميكات البدهي بصفة الهشاشة وقابلية الكسر، فإنها تتضمّن أقسى المواد المعروفة. وقد استُخدمت هذه السيراميكات العالية الجودة، ومن أمثلتها كربيد السليكون،

لصنع مكوِّنات المحرّكات النفاثة والعنفات وضواغط هواء محرّكات السيارات (Turbocharger) وأدوات القطع.

يختلف التلبيد بالأمواج الميكرويّة قليلاً عن تسخين فطيرة. يوضع المسحوق في حقل أمواج ميكرويّة، فتسخن الحُبيْبات بسبب امتصاصها طاقة الإشعاع. ويرفع هذا درجة حرارتها إلى ما فوق 1000 مْ، وهي درجة حرارة كافية لجعل ذرّات المادة تتحرك بحيث تنساب الحُبيْبات المتجاورة معاً. إن إحدى مزايا هذه الطريقة مقارنةً بطرائق التسخين المعتادة هي أن الأمواج الميكرويّة تخترق كامل المادة وتُمتَصّ ضمنها، بدلاً من انتقال الحرارة تدريجياً من الخارج إلى الداخل بالنقل الحراري. هذا يعني امتصاصاً أكفأ للطاقة، ومدة معالجة أقصر. دقيقة واحدة أو نحوها تكفي لتلبيد مسحوق سيراميكي، وتحويله إلى كتلة صلبة من الحُبيْبات المندمجة معاً.

تُستخدم الأمواج الميكرويّة اليوم لمعالجة مواد شديدة التنوُّع. فيمكن استخدامها مثلاً لمعالجة الخشب والمنسوجات والأطعمة، ولتصليد اللّدائن وحتى تحريض التفاعلات الكيميائية. لكن ثمة مشكلة في استخدامها لتشغيل المعادن، لأن المعادن تعكسها. إن الأمواج الميكرويّة تنعكس عن المعادن كانعكاس الضوء عن مرآة، وهذا ما ثبَّط الباحثين عن محاولة استخدامها لتشكيل الأجسام المعدنية.

إلا أن أغراوال وزملاءه بيَّنوا أنه برغم عكس صفيحة المعدن للأمواج الميكرويّة، فإن المعادن تبدو في حالة المسحوق غير عاكسة. لذا تمكَّنوا من تلبيد أجسام كثيفة من مساحيق جميع المعادن التي جرَّبوها ومنها الحديد والفولاذ والنحاس والألمنيوم والنيكل. وكانت جرعة من الأمواج الميكرويّة مدتها 10 ـ 30 دقيقة كافية للتلبيد، وفي حالات عدة كانت المعادن الملبَّدة بالأمواج الميكرويّة أكثف وأصلب من تلك الملبَّدة بالتسخين العادي.

## التشكيل الانسيابي

التشكيل الانسيابي (Flowforming) هو سيرورة متقدمة للتشغيل على البارد تُعطي أنابيب وأسطوانات رقيقة الجدران دقيقة الأبعاد من دون وصلات. ونتيجة لإلغاء اللحام، تتصف المكوِّنات الناتجة بخواص ميكانيكية أفضل، وبإنهاءات سطحية ممتازة، وبسيطرة ممتازة على الأبعاد. والسمات الصعبة التحقيق بطرائق التشكيل الأخرى، كزيادة أو إنقاص سماكات الجدران، والاستدقاقات والأقطار والدرجات، سهلة التحقيق بهذه الطريقة.

**وقد جرى التشكيل الانسيابي للمواد الآتية بنجاح:**

- جميع خلائط التيتانيوم ومنها الـ Ti-6Al-4V.
- جميع خلائط النيكل.
- جميع أنواع الفولاذ العديم الصدأ، ومنها الفولاذ العديم الصدأ المقسَّى حرارياً.
- الفولاذات الكربونية.
- النيوبيوم والزركونيوم والتانتاليوم.
- جميع المعادن المطاوعة.

**وباختصار، ينبغي اللجوء إلى التشكيل الانسيابي إذا كانت ثمة حاجة إلى أيٍّ من الخصائص الآتية في القطعة المشغَّلة:**

- شكل نهائي عالي الدقة عديم الوصلات.
- خواص ميكانيكية جيدة.
- بنية حُبيْبية اتجاهية متجانسة.

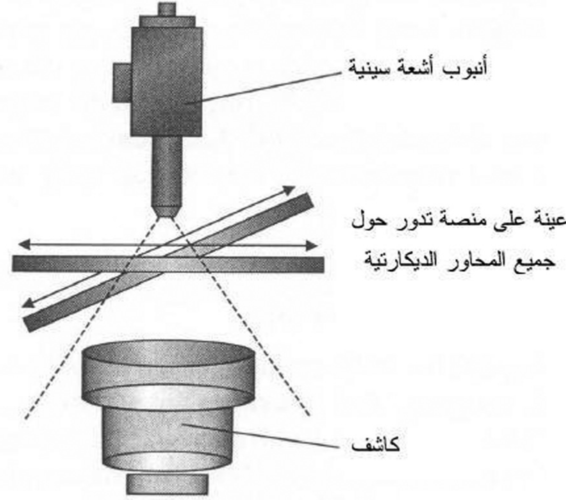
- سماكة جدار متغيرة عند السطح الخارجي (قطر خارجي متغير.
- إنهاءات سطحية داخلية ناعمة.
- الرغبة في إلغاء اللحام.

## الفحص بالأشعّة السينية

إن التوجه الحالي نحو مزيد من التصغير للمكوِّنات وعلبها مستمر في صناعات الإلكترونيات والميكانيك الميكرويّة. وأدّت تقانات التصميم والتصنيع الخاصة بالإلكترونيات البصرية، والنظم الكهروميكانيكية الميكرويّة، والنظم الكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة إلى متطلبات جديدة تخص الفحص والتفتيش. يمكن في بعض الحالات إجراء الفحص باستخدام أنابيب الأشعّة السينية وحدها بمقاسات لبقع التبئير تساوي 1 ميكرون أو أقل. وأدّى هذا إلى تطوير مصادر أشعّة سينية نانوية ومتعدّدة التبئير. يسمح الأنبوب المتعدّد التبئير للمشغِّل بالانتقال بين التصوير العالي القدرة، الميكروي أو النانوي التبئير، اعتماداً على متطلبات التطبيق. صحيحٌ أن اختيار التبئير الميكروي أو النانوي يعتمد على مقاس البقعة المطلوب، إلا أن نمط القدرة العالية في الأنبوب المتعدّد التبئير يُستخدم لتصوير وفحص الأجزاء الكثيفة. لقد صُمِّم الأنبوب لتوفير مزية محدّدة هي تقديم أعلى شدة للأشعّة السينية ضمن أنبوب نقل يتحمَّل 160 كيلو فولت.

تُلتقط صورة مرئية لبُنية المادة الداخلية عندما تمر الأشعّة السينية عبر المادة لتصطدم بلوح تصوير حساس أو بشاشة فَلْورية. وتعتمد الظلال التي تظهر على اللوح أو الشاشة على عتامة (لاشفافية) أجزاء القطعة المفحوصة المختلفة. مثلاً، الصدع في كرة لحام قصديري

تُرى بسهولة لأن الكرة أشدّ عتامة من الفراغ الناجم عن الصدع.




**الشكل 12 ـ 41: رسم توضيحي لنظام أشعة سينية شائع يُستخدم في التفتيش الصناعي.**

## نظام فحص بالأشعّة السينية ميكروي التبئير

يتألَّف نظام الأشعّة السينية مبدئياً من منبع أشعّة سينية مفتوح أو كتيم، ومنصّة لحمل وتحريك العيّنة التي سوف تُفحص، وكاشف للأشعّة السينية (انظر الشكل 12 ـ 41):

● مولِّد الجهد الكهربائي العالي **(High- Voltage Generator)**: يوفِّر هذا المولِّد القدرة اللازمة لمدفع إلكتروني لإصدار الأشعّة السينية، ولإلكترونيات التحكّم والحواسيب المتضمِّنة برمجيات معالجة الصورة.

● **منصة التحريك (Manipulator)**: تُستخدم منصة لتحريك وتدوير القطعة بدقة عالية في محاور الإحداثيات الديكارتية الثلاثة. يجب أن تكون المنصّة قادرة على تحقيق سرعات انسحابية ودورانية

مختلفة، لتحقيق بحث سريع عند تكبير قليل أو فحص متأنٍّ مع تكبير شديد. على سبيل المثال، يمكن للحركة في المستوي الأفقي أن تتغيّر من بضعة ميكرونات في الثانية حتى بضع مئات من الميليمترات في الثانية.

● **الكاشف (Detector)**: وظيفة الكاشف هي معالجة معلومات الأشعّة السينية في الزمن الحقيقي لتحويلها إلى صورة مرئية للعين البشرية أو لنظام رؤية إلكتروني. إن أكثر الكواشف انتشاراً هو مضخّم ضوئي للأشعّة السينية مع كاميرا فديوية لتحويل الأشعّة السينية إلى ضوء مرئي. وتحتوي الكواشف المطوَّرة أخيراً كاميرات ذات مجال واسع لتغيّرات شدة الأشعّة السينية مع كواشف رقمية مباشرة ذات شاشة مسطّحة.

## الفحص بالأشعّة السينية النانوية التبئير

أدّى توجّه صناعة الإلكترونيات نحو مزيد من تصغير وتكثيف المكوِّنات الإلكترونية، وظهور النظم الكهروميكانيكية والكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة، إلى تطوير تقانة الأشعّة السينية النانوية التبئير. تُعرَّف تقانة التبئير النانوي بأنها تقانة تكوِّن بقعة مبأّرة يقل قطرها عن 1 ميكرون تمكّن من رؤية التفاصيل الضرورية لفحص البُنى المنخفضة الكثافة بميْز عالٍ، وكشف الأشكال الفائقة الصغر الشائعة اليوم في صناعة الإلكترونيات.

تلائم نظم الفحص بالأشعّة السينية، النانوية التبئير، على وجه خاص التطبيقات ذات المكوِّنات والدارات والتجهيزات من دون الميكرويّة، ومنها النظم الكهروميكانيكية والكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة، وتلك التي في مستوى علبة الرقاقة الإلكترونية. في مثل هذه الحالات، لا يمكن تحقيق الميز والدقة اللازمين لكشف العيوب في كتل اللحام القصديري إلا بتقانة التبئير النانوي.

## مستقبل الفحص بالأشعّة السينية

ثمة حاجة إلى كل من نوعي التبئير، الميكروي والنانوي، للتصوير بالأشعّة السينية في الزمن الحقيقي. ونظراً إلى أن متطلبات الفحص يمكن أن تشتمل على تطبيقات التبئير الميكروي التي تتطلب قدرة أشعّة سينية عالية، وعلى تطبيقات تبئير نانوي التي تتطلب ميْزاً عالياً، يجد منتجو أنابيب الأشعّة السينية أن النظم المتعدّدة التبئير هي الملائمة. تتضمّن تلك الأنابيب نمطاً للقدرة العالية للبنى الكثيفة التي تحتاج إلى كثافة أشعّة عالية لإجراء الفحص، كما في حالة القطع المصبوبة والملحومة والمشغَّلة ميكانيكياً. ويحصل الانتقال بين أنماط العمل بنقرة على زر على لوحة المفاتيح أو الفأرة في أي وقت في أثناء عملية الفحص.

في كثير من التطبيقات، يوفِّر التبئير الميكروي ميْزاً وتبايناً وتضخيماً تكفي لإجراء عملية الفحص. لكن في ما يخص القطع الصغيرة والدّارات الكثيفة حيث يتطلب تمييز الأشكال بقعة تبئير أصغر مما يوفِّره التبئير الميكروي، فإن التبئير النانوي هو الحل. إن تنامي تطبيقات النظم الكهروميكانيكية والكهروميكانيكية البصرية الميكرويّة يشير إلى توجه مستمر نحو مزيد من التصغير الذي ينطوي على مستقبل مشرق لتقانة التصوير بالأشعّة النانوية التبئير.

## الهوامش

1. U. S. Patent # 6.500,370 (July 2003), P 25, NASA Tech Briefs-LAR-15470-1.
2. H. J. Belvin, [et al.], «Dry Process for Making Polyimide/Carbon & Boron-Fiber,» Tape, *NASA Tech Briefs*, LAR-15470-1, 2003.
3. W. H. Hunt, Jr., and D. R. Herling, «Aluminum Metal Ma-

trix Composites,» *AM& P*, vol. 162 (#2 Feb 2004), pp. 39-42.
4. Patrickk@e-composites.com; p. 2 of 5 and *Composites Week*, vol. 5, #48 (2 Dec 2003).
5. B. Berenberg, «Liquid Composite Molding Achieves Aerospace Quality,» *High-Performance Composites* (Nov 2003), pp. 18-22.
6. AF Man Tech Highlights, CoRTM Process Reduces Fabrication & Assembly Costs, p. 10 (Summer 2003).
7. S. Black, «New Approaches to Cost-Effective Tooling,» *High-Performance Com* (July 2003), pp. 30-35.
8. D. Heider and J. W. Gillespie, Jr., «Automated VARTM Processing of Large Scale Composite Structures,» *Journal of Advanced Materials* (Oct 2004), 6 p.
9. S. Reuterlöv, «Grooved Core Materials Aid Resin Infusion: Influence on Mechanical Properties,» *SAMPE Jrl.*, vol. 39 (#6 Nov / Dec 2003), pp. 57-64.
10. H. Uchida, T. Yamamoto and H. Takashima, «Development of Low-Cost, Damage-Resistant Composite Using RFI Processing,» *SAMPE Jrl.*, vol. 37 (#6, Nov/ Dec 2001), pp. 16-20.
11. S. Reuterlöv, «Infusion: The DIAB Method,» <http://www.rpasia.com> /rpasia/ confsesle.html; p. 1 of 1, 07/28/02.
12. S. Black, «An Elegant Solution for a Big Component Part,» *High-Performance Composites* (May 2003), pp. 45-48.
13. M. Frost, D. Solanki and A. Mills, «Resin Film Infusion Process of Carbon Fibre Composite Automotive Body Panels,» *SAMPE Jrl.*, vol. 39 (#4, July / August 2003), pp. 44-49.
14. S. Yoshioka, «Laser Cuts & Bends Foil,» *Laser Focus World* (Sept 2003), p. 13.
15. http://jazz.nist.gov/atpcf/ prjbriefs/ prjbrief.cfm?ProjectNumber=00-00-5269; p. 1 of 2,08/08/03. GE Global Research, One Research Circle, Bldg KW, Rm C293, Niskayuna, NY 12309.
16. A. M. Ozkan-Anderson, «Pulsed Lasers Micromachine Photonic Integrated Circuits,» *Laser Focus World* (Nov 2003), pp. S.3-S7.
17. R. Grylls, «Intricate Parts from the Inside Out,» *Machine Design* (4 Sept 2003), pp. 56-62.

18. < http://jazz.nist.gov/atpcf/prjbriefs/prjbrief.cfm?ProjectNumber = 00-00-5222 > ; p. 1 of 2; Optomec Design Co., 3911 Singer, N.E., Albuquerque, NM 87109.
19. R. Grylls, «Laser Engineered Net Shapes,» *AM&.P*, vol. 161, #1 (Jan 2003), pp 45-46-86.
20. M. R. Hill, [et al.], «Laser Peening Technology,» *AM&.P* (Aug 2003), pp. 65-67.
21. Jones-Bey, H. A., «Laser Peening Enters Commercial Mainstream,» *Laser Focus World* (Jan 2004), pp. 42-46.
22. A. Kopel and W. Reitz, «Laser Surface Treatment,» *AM&.P*, vol. 156 (#1 Sept 1999), pp. 39-41.
23. R. Hull [et al.], Laser Cladding/Glazing as a Surface Coating Alternative, AF Pollution Prevention Grp., AFRL/ML &LHMEL (Jan 2001), 8 p.
24. B. H. Warnes, «Cool Coatings Let Engines Run Hotter,» *Machine Design* (12 Dec 2002), pp. 58-61.
25. M. W. Leiby, «A Better Way to Produce Thin-Film Prototypes,» *Machine Design* (20 Feb 2003), pp. 114-118.
26. A. H. Deutchman and R. J. Partyka, « Ion Beam Enhanced Deposition,» *AM&.P* (July 2003), pp. 33-35.
27. D. Bell, «CrN Nanocrystalline PVD Coatings Are Harder, Tougher,» *AM&.P* (July 2003), p. 14.
28. «New Tools Maximize New Machine Designs, Makino, Inc.,» *Modern Applications News (MAN),*"(Jan 2004), pp. 38-40.
29. M. Koval, «High-Dazzle Coatings at Low Temperatures,» *Machine Design* (20 Nov 2003), pp. 66-72.
30. T. Degitz and K. Dobler, «Thermal Spray Basics,» *WJ* (Nov 02), pp. 50-61.
31. M. L. Thorpe, «Thermal Spray Industry in Transition,» *AM&.P*, vol. 143 (#5 May 1993), pp. 50-61.
32. Inovati, Santa Barbara, CA (5 Aug 2002).
33. S. Wichmanowski, «Pseudo-Alloys for Spray Metal Tooling,» *AM&.P*, vol. 161 (#4 April 2003), pp. 33-34.
34. R. S. Mishra, «Friction Stir Processing for Superplasticity,» *AM&.P*, vol. 162 (#2 Feb 2004), pp. 45-47.
35. R. S. Mishra, «Friction Stir Processing Technologies,» *AM&.P* (Oct 2003), pp. 43-46.
36. Y. J. Chao and S. Liu, «Temperature, Force, & Power in

Friction Stir Welding,» *AM&.P,* vol. 161 (#5 May 2003), pp. 44-45.
37. D. McKeown, «FSW Aluminum Sheet for Airliners Has High Strength,» *AM&.P* (Feb 2004), p. 19.
38. W. J. Lang, «Ceramic Welding Used with High Temperature CCTV in Advanced Repair Technique for Glass Furnaces,» IH (May 1998), pp. 51-52.
39. C. Zvosec, «Using Ceramic Welding to Extend the Life of Gas/Oxy Furnaces,» *Ceramic Industry* (June 1998), p. GMT-4-5.
40. M. Singh, «Ceramic Joining Technology,» *AM&.P (*Oct 1998), pp. 89-90.
41. National Industrial Research Institute, Superplastic Compressive Deformation Process for Strengthening and Toughening Technology of Silicon Nitride *JETRO* (May 1998), pp. 16-17.
42. B.-S. Chiou, C.-D. Young and J.-G. Duh, «Liquid Phase Bonding of Yttria Stabilized Zirconia with CaO-$TiO_2$-$SiO_2$ Glass,» *J. of Mals. Sci.,* vol. 30n5 (1 March 1995), pp. 1295-1301.
43. A. Krajewski, «Joining of $Si_3N_4$ to Wear-Resistant Steel by Direct Diffusion Bonding,» *J. of Mals. Processing Technology*, vol. 54 n 1-4 (Oct 1995), pp 103-108.
44. H. Nishi and T. Araki, «Low Cycle Fatigue Strength of Diffusion Bonded Joints of Alumina Dispersion Strengthened Copper to 316 Stainless Steel,» *NTIS Alert,* vol. 96, no. 11 (1 June 1996), p. 20.
45. O. Ohashi, «Diffusion Welding of SUS304L Stainless Steel to Titanium,» *Weld International*, vol. 10, no. 3 (1996), p. 188.
46. Ch. Simons, L. Schrapler and G. Herklotz,» *Gold Bull.*, 33(3) (2000), pp. 89-96 and 102.
47. Chipscale Review Website at http://chipscalereview.com/issues/ 0501/ trends.html.
48. Gold Survey 2001, Gold Fields Mineral Services Ltd.(April 2001).
49. Market Analysis for Microsystems 1996-2002, The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems; (www.nexus-emsto.com).

50. S. Alwart and U. Baudis, «Low-Temperature Nitrocarburizing,» *AM&P* (Sept 1998), pp. 41-43.
51. D. H. Herring, «Low-Pressure Vacuum Carburizing,» *Heat-Treating Progress* (June/ July 2003), pp. 56-60.
52. R. L. Houghton, «Vacuum Carburizing: The View From a Commercial Shop,» *Heat Treating Progress* (June/July 2003), pp. 32-35.
53. A. Formhals, Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads, U.s. Patent 1, 975, 504 (1934).
54. D. H. Reneker [et al.], «Bending Instability of Electrically Charged Liquid Sets of Polymer Solutions in Electro spinning *J. Appl. Phys.*, 9, Part I (2000,) p. 87.
55. P. W. Gibson, H. L. Schreuder-Gibson and C. Pentheny, «Electrospinning Technology: Direct Application of Tailorable Ultrathin Membranes,» *J. Coated Fabrics*, 28 (1998), p. 63.
56. P. W. Gibson [et al.], «Humidity Dependent Air Permeability of Textile Materials,» *Text. Res. J.*, 69 (5) (1999), p. 31.
57. P. W. Gibson, D. Rivin and C. Kendrick, «Convection/Diffusion Test Method for Porous Textiles,» *International Journal of Clothing Science and Technology*, 12 (2) (2000), p. 96.
58. P. P. Tsai, H. L. Schreuder-Gibson and P. W. Gibson, Fibrous Electret Filters Made by Different Electroprocesses, Proceedings of the 8th World Filtration Congress, Brighton, England, 2000.
59. S. Paquette, «3-D Scanning in Apparel Design and Human Engineering,» *IEEE Computer Graphics Applications*, 16 (5) (1996), p. 11.
60. A. Offringa and C. R Davies, «Gulfstream V Floors - Primary Aircraft Structure in Advanced Thermoplastics,» *Jrl. of Advanced Materials*, 27(2), 2 (1996).
61. A. R. Offringa, Thermoplastic Composites - Rapid Processing Applications Composites: Part A, 27 A 329 (1996).
62. F. N. Cogswell, «The Processing Science of Thermoplastic Structural Composites, *International Polymer Processing*, 1(4) (1987), p. 157.
63. PAM-FORM™, Engineering Systems International, 20 rue Saarinen, 94578 Rungis Cedex, France.
64. de Luca, P., Lefebure, P., & Pickett, A. K., Numerical and Experimental Investigation of Some Press Forming Para-

meters of Two Fibre Reinforced Thermo-plastics, Proc. Fourth International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM '96), Aberyswyth, U.K., 7-9 September 1996.
65. F. N. Cogswell and D. C.Leach, «Processing Science of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites,» *SAMPE Jrl*, 24 (3), 11(1988).
66. Mantell, S. C. & Springer, G. S., Manufacturing Process Models for Thermo - plastic Composites, *Journal of Composite Materials,* 26 (16), 1992, p. 2348.
67. A. S. Tam and T. G. Gutowski, «Ply-Slip During the Forming of Thermoplastic Composite Parts,» *Journal of Composite Materials*, 23(6) (1989), p. 587.
68. B. P. van West, R. B. Pipes and M. Keefe, «A Simulation of the Draping of Bidirectional Fabric over Three-Dimensional Surfaces,» *Journal of the Textile Institute*, 81 (4) (1990), p. 448.
69. O. K. Bergsma, Computer Simulation of the 3D Forming Processes of Fabric Reinforced Plastics, Proc. Ninth International Conference on Composite Materials, Madrid, 12-16 July 1993, vol. IV, p. 560.
70. FiberSim, Composite Design Technologies, Wellesley Hills, MA.
71. L. Rubin and J. Ponte, «Ion Implantation in Silicon Technology,» http:/ /www. tipmagazine.com/tip/INPHFA/vol-9/iss-3/p 12.html, pp. 1-7, May 28, 2003.
72. E. Rimini, *Ion Implantation: Basics to Device Fabrication* (Boston: Kluwer Academic Publishers:, 1995) p. 393
73. L. Rubin and W. Morris, «High-Energy Ion Implanters and Applications Take Off,» *Semiconductor International* (1997), 20, p. 77-85.
74. Ryssel, H., Ruge, I., *Ion Implantation* (NY: John Wiley and Sons, 1986), 350 p.
75. J. F. Ziegler, ed., *Ion Implantation: Science and Technology*, Ion Implant Technology Co., (Edgewater, MD: [n. pb.], 2000, 687 p.
76. E. Chason [et al.], «Ion Beams in Silicon Processing and Characterization,» *J. App. Phys*, 81 (10) (1997) pp. 6513-6561.
77. M. I. Current, «Ion Implantation for Silicon Device Manu-

facturing: A Vacuum Perspective,» *J. Vac. Sci. Tech. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 14 (3) (1996), pp. 1115-1123.
78. L. M. Sheppard, «Gelcasting Enters the Fast Lane, Ceramics Industry,» (April 2000), pp. 26-34.
79. C. Krause, «ORNL's Gelcasting: Molding the Future of Ceramic Forming?,» <http://www.ornl.gov/ORNLReview/rev28-4/text/gelcast.htm, (2> August 2000), pp. 1 of 13
80. J. Ceserano, «Robocasting: A New Way to Fabricate Ceramics,» *Machine Design* (8 April 1999), p. 41, and *Design News* (04/05/99), p. 23.
81. I. Gibson, «Materials for Rapid Prototyping: Looking to the Future,» *Time-compression Technologies*, vol. 4, #7 (2001), pp. 30-52.
82. P. Dvorak, «The Next Step in Rapid Prototyping,» *Machine Design* (21 August 2003), pp. 59-62.
83.,» EWI Prompts Creative Commercialization,» *EWI Insights*, vol. 16, #2 (Spring 2003), p. 3.
84. S. A. Swan, «Relatively Inexpensive Rapid Prototyping of Small Parts,» *NASA Tech Briefs* (July 2003), pp. 48-49.
85. C. H. Ho, I. Gibson and W. L.Cheung, «Effect of Energy Density on Property and Morphological Development of Selective Laser Sintering Polycarbonate,» *J. Materials Processing Technology,* Elsevier, 89-90 (April 1999), pp. 204-210.
86. X. Quian and D. Dutta, Features in Layered Manufacturing of Heterogeneous Objects, Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium, 1998, pp. 689-696.
87. V. R. Gervasi and R. S. Crockett, *Composites with Gradient Properties Form Solid Freeform Fabrication, Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium (1998), pp. 729-735.*
88. A. G. Cooper [et al.], *Automated Fabrication of Complex Molded Parts using Mold SDM, Proc. Solid Freeform Fabrication Symposium* (1998), pp. 721-738.
89. D. A. Klosterman [et al.], Development of a Curved LOM Process for Fiber Reinforced Composite Materials, Proc. 8th European Rapid Prototyping and Manufacturing Conf. (1999), pp. 353-365.
90. G. M. Lous [et al.], *Fabrication of Curved Ceramic/Polymer Composite Trans-ducers for Ultrasonic Imaging Applications by Fused Deposition of Ceramics, Proc. Solid Freeform Fabrica-*

*tion Symposium* (1998), pp. 713-719.
91. W. M. Ling and I. Gibson, «Possibility of Colouring SLS Prototype Using the Ink-Jet Method,» *Jrl of Rapid Prototyping*, vol. 5 (4) (1999).
92. A. G. von Matuschka, Borieren (in German), Carl Hanser Verlag Wien (1977).
93. H. Kunst and O. Schaaber, « Beobachtungen beim Oberf Lächenborieren von Stahl II - ber Wachstumsmechanismen und Aufbau der bei Eindiffusionvon Bor in Eisen bei Gegenwart von Kohlenstoff entstehenden Verbindungs - und Diffusionsschichten,» (in German), *HTM,* 22, 1 (1967).
94. H. Kunst and O. Schaaber, 'Beobachtungen beim OberfLächenborieren von Stahl III -Borierverfahren,» (in German), *HTM*, 22, 275 (1967).
95. P. Casadesus, C. Frantz and M. Gantois, «Boriding with a Thermally Unstable Gas,» *Metallurgical Transactions:* 10 A 1739 (1979).
96. A. Kper, H.-R. Stock and P. Mayr, Plasma-Assisted Boronizing Using Trimethyl Borate, Proc. 12th IFHTSE Congress, Melbourne, Australia (Eds. IME Australasia Ltd) 3, 177 (2000).
97. A. Kper, «Plasma-Assisted Boronizing,» *AM&P*, vol. 161 (#3 March 2003), pp 20-22.
98. Brown, S. B. & Flemings, M. C., Net-Shape Forming Via Semi-Solid Processing AM & P, vol. 143, #1, Jan 1993, pp. 36-40.
99. J. A. Yurko, R. A. Martinez and M. C. Flemings, «Commercial Development of the Semi-Solid Rheocasting (SSR™) Process,» *Metallurgical Science & Technology Teksid Aluminum*, vol. 21, no. 1 (June 2003), pp. 10-15.
100. R. A. Martinez, [et al.], *NADCA Transactions,* Cincinnati, OH (2001) pp. 47-54.
101. M. Adachi, and S. Sato, *NADCA Transactions*, Cleveland, OH, T99-022 (1999).
102. Shibata, R. [et al.], *Proceedings of the 5th International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites*, Golden, CO, pp. 465-470, 1998.
103. M. C. Flemings, *Met Trans. B.*, vol. 22 B (1991) pp. 269-293.

104. J. A. Yurko, R. A. Martinez and M. C. Flemings, *Proceedings of the 7th International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites*, Tsukuba, Japan, 2002, pp. 659-664.
105. C. S. Rice and P. F. Mendez, «Slurry-Based Semi-Solid Die Casting,» *AM&P*, vol. 159 (#10 Oct 2001), pp. 49-52.
106. S. J. Mraz, «Birth of an Engine Blade,» *Machine Design* (24 July 1997), pp. 39-44.
107. I. Parker, «Turnaround at Turbomeca,» *Helicopter World* (May 1997), pp. 11-13.
108. R. N. Katz, «Single Crystal Ceramics,» *Ceramic Industry* (Feb 2000), p. 16.
109. E. Jerby [et al.], «The Microwave Drill,» *Science*, 298 (2002), pp. 587-589.
110. P. Ball, «Microwaves Drill Ceramics,» *Nature Science Update*, pp. 1-2, http://www.nature.com/nsu. 18 oct 2002.
111. D. Agrawal, *Nature*, Macmillan Magazines Ltd (17 June 2002).

# المراجع

«An Elegant solution for a Big Composite Part.,» *High-Performance Composites*: May 2003, pp. 45-48.

Anderson, T. «New Developments in Aluminum Shipbuilding.,» *Welding Journal*: Feb 2004, pp. 28-30.

Balmforth, M. C. [et al.]. Inertia Welding for High-Pressure Hydrogen Storage, SNL, Ibid.

Campbell, F. C. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. N.Y.: Elsevier 2004.

Carmody, S., Parts Live Longer with Lasers, Machine Design, April 1, 2004, p. 24.

Carter, D. W. and P. Meltzer (Jr.). «Vacuum-Mold Repair System.,» *AFRL Technology Horizons*: vol. 5, #4 August 2004, p. 50.

«Ceramics Take the Heat.,» *Machine Design*: 20 Nov 20 2003, p. 31.

«Complex Composites Lighten NATO Copter.,» *High-Performance Composites*: March 2003, pp. 44-46.

«Composite Nacelles: Flying Toward New Horizons.,» *High-Performance Composites*: May 2004, pp. 49-53,

Decker, R. F. «Advances in Semi-Solid Modeling.,» *AM&.P*: vol. 162, #4 April 2004, pp. 41-42.

«Dupont Materials Help Keep Mars Rovers Moving.,» *NASA Tech Briefs*: May 2004, p. 18.

«Europe's Infusion Pioneer Simplifies Process with Bottom Up Approach.,» *Compos Technology*: Oct 2003, pp. 34-38.

Feng, Z., X. L. Wang and S. A. David. Prediction of Residual Stresses and Property Distributions in Friction Stir Welds of Aluminum Alloy 6061- T6, ORNL, ibid,

Hancock, R. «Friction Welding of Aluminum Cuts Energy Costs by 99%.,» *Welding Journal*: Feb 2004, p. 40.

Hazen, J. (ed.). Sourcebook 2004, vol. 9, Dec 2003, 178 p, www.composites world.com.

«High-Performance Composites: An Overview, High-Performance Composites, 2003 Sourcebook.,» pp. 7-19, www.hpcomposites.com; International Edition, Nov 2002.

http://link.abpi.net/L.php?20021024A6.

http://link.abpi.net/l.php?20021024A6; p. 3 of 4, 10/24/02.

http://lists.newsforindustry.com/ cgi-bin3 /DM/y / egG10EpoT40CKgOB121 OAD.

«Hy-Bor Provides Performance and Feel to World's Lightest Production Bike Frame.» *Composites Week*: vol. 5, no 36, 8 Sept 2003, p. 1 of 4.

Kimapong, K. and T. Watanabe. «Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel.,» *Welding Journal:* Oct 2004, pp. 277-s to 282-s.

Kinney, P. and R. W. Hunt. Optimization of a Laser + GMAW Hybrid Welding Process, Ohio State Univ., Ibid.

Kren, L. «New «Window,» of Opportunity For E-Beam Welding.,» *Machine Design*: 8 July 2004, pp. 94-98.

Lerner, E. J. «Biomimetric Nanotechnology.,» *The Industrial Physicist*: vol. 10, #4, Aug/ Sept 2004, pp. 16-19.

Lienert, T. and R. W. Carpenter, Beam Profiling of a 3.3 kW CW Cd:YAG Laser, LANL, 2004 AWS Welding Conf., Chicago, IL, April 6-8, 2004.

MacCallum, D. O. Laser and E-Beam Joining Unusual Fe-Base, Ni-Base, and Refractory Alloys, SNL, Ibid.

«Manufacturers Welcome New Reinforcement Forms.,» *Composites Technology*: April 2003, pp. 12-21.

Marz, S. «Using Microtechnology to Get to Nanotechnology.,» *Machine Design*: 2 Sept, 2004, pp. 65-68.

Meador, M. A. [et al.]. «Meador Temperature, Ultraviolet Curing of Polyimides.,» *NASA Tech Briefs*: March 1999, pp. 52-53.

Messler, R. W. (Jr.), J. Bell, and O. Craigue. «Laser Beam Weld Bonding of AA5754 for Automobile Structures.,» *Welding Journal*: June 2003, pp. 151-s to 159-s.

Messler, R. W. (Jr.). A Novel Approach to Laser Weld-Bonding Al Autos, RPI, Univ. of Rochester, and Montana Tech Insti., ibid.

«Microwave Steel.,» *Machine Design*: 1 April 1 2004, p. 40.

«Milling Diamond Coatings.,» *Laser Focus World*: Nov 2003, p. 23.

«Missile Composite Body Program Saves Millions.,» *AFRL Technology Horizons*: Sept 2002, p. 6.

Mohamed, M. H [et al.]. «A New Generation of 3D Woven Fabric Preforms and Composites.,» *SAMPE Journal*: vol. 37, #3, May/ June 2001, pp. 8-17.

«New RTM/VM/RTM Light Injection Valve, p. 1, 11/27/03.,» http:/ /www.netcomposites news. asp 71880.

Nguyen, J. P. [et al.]. Friction Stir Processing of Nickel Aluminum Bronze, NSWC, ibid.

«Non-Destructive Testing.,» *AM&P*: vol. 162, #1, Jan 2004, pp. 39-44.

Nordwall, B. D. «Tiny Ceramic Spheres Used to Absorb Energy.,» *Av. Week & Sp. Tech*: Sept 6, 1999, pp. 68-69.

Nowak-Neely, B. M., D. O. MacCallum and G. A. Knorovsky. Controlled Scanning Electron Beam Micro-to-Nano Welding: Micro-to-Nano Electron Beam Welding Via Adapted Scanning Electron Microscopy, SNL, 2004 AWS WeldConf., Chicago, IL, April 6-8, 2004.

C. Occhialini. «Robotic Welding of Aluminum Space Frames Speeds Introduction of Sports Car.,» *Welding Journal*: Feb 2004, DD. 24-27.

«Opportunities in Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic

Composites 2003-2008.», *Composites Week*: vol. 5, no. 25, June 24, 2003, p. 2 of 6.

Rathod, M. J. and M. Kutsuna. «Joining of Aluminum Alloy 5052 and Low-Carbon Steel by Laser Roll Welding.,» *Welding Journal*: Jan 2004, pp. 16-s to 26-s.

«RTM Process Turns Out High-Quality Jet Engine Blades.,» *High-Performance* Composites July 2004, pp. 38-41.

Schackleford, J. F. *Bioceramics: Applications of Ceramics and Glass Materials in Medicine*. Technomic Publishing Co., Inc., 120 p, 1999.

Schaeffer, R. D. and M. Stepanova. «A Radiant Solution.,» *Ceramic Industry*: June 1999, pp. 34-47.

Schulze, K.-R. and D. E. Powers. «EBW of Aluminum Breaks Out of the Vacuum,» *Welding Journal*: Feb 2004, pp. 32-38.

Singh, M. «Reaction-Forming Method for Joining SiC-Based Ceramic Parts.,» *NASA Tech Briefs*: March 1999, pp. 50-52.

«Smoke Spun into Fiber.,» *Industrial Physicist*: vol. 10, #4, Aug/Sept 2004, pp. 13-14.

«Thermal Diffusion Process Boosts Die Life by 10X.,» pp. 34-37, www.modernappli

«Ultra-High Temperature Ceramics.,» http:/ /link.abpi.net/l.php?20031104A2; pp. 1-2 of 5, 11/04/03.

Weinberg, M. and J. Wyzykowski. «Powering Unmanned Aircraft.,» *Aerospace Engineering*: November 2001, pp. 23-26.

## الثبت التعريفي

**إجهاد (Stress)**: القوة المتسبّبة في التشوُّه مقسومة على مساحة السطح الذي تُطبَّق عليه.

**إجهاد القص (Shear Stress)**: مركِّبة الإجهاد التي تجعل الطبقات المتوازية في مادة تنزلق في ما بينها في مستوياتها نفسها.

**اختبار إيزود (Izod Test)**: اختبار مُمقيَس من قبل منظمة مقاييس المواد واختباراتها الدولية (الأميركية) ASTM، لاختبار مقاومة الصدم. وقد سُمِّي الاختبار باسم المهندس الإنجليزي إدوين جيلبرت إيزود (Edwin Gilbert Izod) الذي عاش بين العامين (1876 ـ 1946). تُستخدم في الاختبار عادة عيّنة مثلومة، وتُوضع ذراع على ارتفاع معيّن (حاملة طاقة كامنة ثابتة)، ثم تُترك لتسقط سقوطاً حراً على العينة. وتُحدَّد مقاومة المادة للصدم بالطاقة التي امتصتها في أثناء الصدم. يختلف هذا الاختبار عن اختبار تشاربي في أن العينة توضع على شكل عارضة مثبتة من أحد طرفيها، مع ترك الطرف الآخر حراً. يمكن استخدام هذا الاختبار لتحديد الحساسية للثلم.

**اختبار برينيل للقساوة (Brinell Hardness Test)**: اختبار تُضغط فيه كرة فولاذ قاسية بقوة محدَّدة على سطح المادة المختبرة. والنتيجة هي عدد برينيل للقساوة (Brinell Hardness Number) (BHN) الذي ينتُج من تقسيم القوة المطبقة على مساحة السطح المتمثل بالأثر الذي تتركه الكرة على المادة .

**اختبار تشاربي للصدم (Charpy Impact Test)**: اختبار مشابه لاختبار إيزود (انظر اختبار إيزود) باستثناء أن العينة المثلومة توضع في وضعية حني ثلاثية النقاط .

**اختبار روكويل للقساوة (Rockwell Hardness Test) (HRb) (HRc)**: تعني القساوة في هذا الاختبار مقاومة الاختراق. وقد سمي الاختبار باسم مخترعه ستانلي ب. روكويل (Stanley P. Rockwell). تُقاس القساوة في هذا الاختبار بضغط أداة خدش على سطح بقوة معيّنة ثم قياس عمق اختراق أداة الخدش لسطح المادة. ثمة عدة أشكال لاختبار روكويل، إلا أن أشهرها وأعمها هو HRb. ويُستخدم الاختبار HRc للمواد القاسية، وتُستخدم اختبارات أخرى للمواد الرقيقة جداً.

**اختبار فيكَّرز للقساوة (Vickers Hardness Test, HV)**: اختبار خدش ميكروي يستخدم هرماً ألماسياً ذا زاوية رأس تساوي 136 كأداة خدش تحت حمل متغيّر. يُستخدم هذا الاختبار عادة لتحديد قساوة الأغشية الرقيقة .

**استقطاب مؤقت (Paraelectricity)**: قابلية المادة، وخاصة البلّورات السيراميكية، للاستقطاب الكهربائي حين تطبيق حقل كهربائي عليها.

**أغار (Agar)**: هلام الطحالب الحمراء.

**امتزاز (Adsorption)**: التصاق جُزَيئات غازية أو سائلة أو صلبة منحلة على سطح ما مشكّلةً غشاءً رقيقاً.

**إنتالبية (Enthalpy)**: الإنتالبية هي تقريباً الفرق بين الطاقة التي يجب صرفها لفك رباط كيميائي، والطاقة المكتسبة من تكوُّن رباط كيميائي جديد.

**انحناء دوّار (Rotating Bending)**: يتدلّى القضيب إلى الأسفل منحنياً بمقدار يعتمد على خواصه المادية. ويحصل الانحناء الدوّار، في أثناء دوران القضيب بسبب اتجاه التدلّي الثابت إلى الأسفل .

**انفعال/ تشوُّه (Strain)**: نسبة التغيُّر الناجم عن الإجهاد إلى حالة الجسم الأصلية.

**انفعال القص (Shear strain)**: هو الانفعال الذي يحصل موازياً لسطح المادة، خلافاً للانفعال العادي الذي يحصل عمودياً على السطح .

**أوستنيت (Austenite)**: أو حديد الطَور غاما، هو مغاير معدني للحديد غير مغنطيسي أو محلول حديد صلب مع عنصر مخلوط به. وأتت الصفة «أوستنيت» من اسم مكتشف المادة وليام شاندلر وأوستن روبرت (William Chandler Roberts-Austen) الذي عاش بين العامين (1843 ـ 1902). يتميّز الأوستنيت ببنية تكعيبية ممركزة الوجه.

**أوليغومر (Oligomer)**: مركَّب ذو بنية تقع بين بنية المونومر والبوليمر ويتكون من عدد محدّد من الوحدات المونومرية. كثير من الزيوت هي مركَّبات أوليغومرية مثل البارافينات السائلة.

**بئر كمومية (Quantum Well)**: حالة كمونية (من الطاقة الكامنة) تأسر الجُسيْمات وتجعلها تتحرك في بُعدين بعد أن كانت حرة الحركة في الأبعاد الثلاثة، بمعنى أنها لا تستطيع الخروج من المستوي الذي تُؤسر فيه. ومن أهم تطبيقاتها أنصاف النواقل.

**بثق بالسحب (Pultrusion)**: سيرورة تصنيع مستمرة للمواد المركبة تسمح بتشكيل خيوط أو ألياف بالسحب عبر قالب تشكيل أنبوبي الشكل.

**بلازماترون (Plasmatron)**: لوحة إظهار (شاشة) مسطّحة تجمع بين تقانتي البلّورات السائلة والبلازما لاستخدامها في أجهزة التلفاز الملوّنة. وهي مشابهة جداً لشاشة البلّورات السائلة، باستثناء أنه تُستخدم فيها خلايا مملوءة بالغاز (بلازما) لصف خطوط البلّورات السائلة، بدلاً من الترانزستورات المستخدمة في تلك الشاشات.

**بلازمون (Plasmon)**: كمُّ اهتزاز البلازما، على غرار الفوتون والفونون اللذين يمثّلان كموم الضوء والصوت .

**بلّورات متساوية الأطوال المحورية (Equiaxed Crystals)**: هي بلّورات ذات محاور متساوية الطول تقريباً. تتصف هذه البلّورات بوجود عدد كبير من المستويات التي يمكنها الانزلاق عليها وهذا ما يفسّر اتصافها بمقاومة ومطاوعة كبيرتين.

**بلُّورة (Crystal)**: مادة صلبة مكوّنة من ذرّات أو جُزَيئات أو شوارد مرتبة في أنماط منتظمة متكررة في جميع الأبعاد المكانية الثلاثة.

**بلوّرة أحادية (Single Crystal)**: مادة متبلورة تتصف شبكتها البلّورية بالاستمرارية وعدم الانقطاع في كامل القطعة حتى حوافها، من دون وجود حدود حُبيْبية. هذا يجعل المواد الأحادية البلّورة مهمة للتطبيقات الصناعية، وذلك بسبب انعدام المفاعيل السلبية التي تنجم عن الحدود الحُبيْبية في الخواص الفيزيائية والكهربائية للمادة.

**بُلَيْرة (Crystallite)**: تُعرّف البُلَيْرة بأنها تلك الحالة من المادة الصلبة التي تتصف بالبنية ذاتها التي تتصف بها البلّورة الأحادية. وغالباً ما تسمّى البُلَيْرة في علم التعدين بالحبيبة. والحالات التي نصادف فيها أجساماً صلبة ذات بلّورات أحادية هي حالات نادرة (أحجار كريمة، سليكون للصناعات الإلكترونية...)، أما معظم الأجسام الصلبة فهي متعدّدة البلّورات وتتألف من عدد كبير من

البلّورات الأحادية التي تربط بينها طبقات رقيقة من المادة الصلبة غير المتبلورة. أما أبعاد البُلَيْرات فهو بين عدة نانومترات وعدة ميليمترات.

**بنية تكعيبية ممركز الجسم (Body Centered Cubic Structure)**: بنية شبكية تتكوّن الخلية فيها من ثماني ذرّات تتوضع على زوايا مكعّب ومن ذرّة واحدة في مركزه.

**بنية تكعيبية ممركزة الوجه (Face Centered Cubic Structure)**: بنية شبكية تتكوّن الخلية فيها من ثماني ذرّات تتوضع على زوايا مكعّب ومن ست ذرّات تتوضّع في مراكز وجوهه وذلك حسب تتالي الطبقات من النمط ABCBAC.

**بنية سداسية متراصة (Hexagonal Close Packed Structure)**: بنية شبكية تتكوّن الخلية فيها من ثلاث طبقات من الذرّات. تحتوي الطبقتان العليا والسفلى على ست ذرّات تتوضع على زوايا مسدَّس، ومن ذرّة واحدة في مركزه. أما الطبقة الوسطى، فتحتوي على ثلاث ذرّات تتوضع بين ذرّات الطبقتين العليا والسفلى حسب تتالي الطبقات من النمط ABABAB، ومن هنا أتت صفة التراص.

**بنية النطاق الإلكتروني (Electronic Band Structure)**: تصف بنية النطاق الإلكتروني في الجسم الصلب نطاقات الطاقة التي يُسمح للإلكترون في الذرّة بامتلاكها أو عدم امتلاكها.

**بوليمر (Polymer)**: مركَّب كيميائي طبيعي أو صناعي يتألف من جُزَيئات كبيرة تتكوَّن من اتحاد مونومرات (وحيدات جُزَيء) بسيطة متماثلة.

**بوليمرات فاعلة كهربائياً (Electroactive Polymers)**: هي بوليمرات يتغيّر شكلها عندما يُطبّق عليها جهد كهربائي. يمكن استعمال هذه البوليمرات مُحِسَّات أو مفعِّلات أو عضلات صُنعية.

**بيريتكتي (Peritectic)**: التفاعل البيريتكتي هو تفاعل عكوس عند درجة حرارة ثابتة بين طَور سائل وطَور صلب لتكوين طَور صلب آخر عند التبريد.

**تحضير الأبخرة فيزيائياً (Physical Vapor Synthesis) (PVS)**: تُصنع بهذه السيرورة بلّورات نانوية باستخدام سيرورة الحمل الحراري لتكثيف الطَور الغازي. وهي تُعطي مسحوقَ بلّورات نانوية ذات جُسيْمات ضعيفة التكتل وسطوح نظيفة.

**تحضير الأبخرة كيميائياً ((Chemical Vapor Synthesis) (CVS)**: طريقة معدلة لتوضيع الأبخرة كيميائياً حيث تُضبط موسّطات السيرورة لتكوين جُسيْمات نانوية بدلاً من الغشاء.

**تحضير عالي درجة الحرارة ذاتي الانتشار (Self-Propagation High Temperature Synthesis) (SHS)**: طريقة تصنيع بالتفاعل الموجي الناشر للحرارة. تبدأ السيرورة الشبيهة بالاحتراق بتسخين جزء صغير من المادة (في أعلاها عادة) حتى الاشتعال، فيشتعل ويُشعل جواره في موجة متوسّعة مصدّرة للحرارة تنتشر في كامل المادة. يمكن بهذه الطريقة صنع مواد عضوية ولاعضوية مختلفة من قبيل المساحيق والخلائط المعدنية والسيراميكات بنقاوة عالية ومقاومة تآكل كبيرة عند درجات حرارة عالية.

**تحليل العناصر المنتهية ((Finite Element Analysis) (FEA)**: تقنية عددية لإيجاد حلول تقريبية لمعادلات تفاضلية جزئية أو لمعادلات تكاملية. وتقوم الطريقة على التخلّص كلياً من المعادلات التفاضلية (في مسائل الحالة المستقرة)، أو تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية إلى منظومة تقريبية من المعادلات التفاضلية العادية تُكامل بعدئذٍ عددياً باستخدام التقنيات المعهودة من قبيل طريقة أويلر.

**تزجيج (Glazing)**: طلي المادة بغشاء أو طلاء صقيل لابلُّوري شبيه بالزجاج بغرض الحماية أو التزيين أو التلوين أو التقوية .

**تشكيل دوراني (Spinning)**: سيرورة يُشكَّل بها قرص أو أنبوب معدني دورانياً ليكتسب شكلاً متناظراً محورياً. لا تختلف في هذا التشكيل مساحة وسماكة القطعة بعد التشغيل عنهما قبل التشغيل.

**تشكيل دوراني انزلاقي (Shear Spinning, Shear forming)**: سيرورة مشابهة للتشكيل الدوراني باستثناء حصول تقلُّص في سماكة جدار القطعة التي يُتحكَّم فيها من خلال التحكُّم بالفجوة بين أداة اللف وعمود التشكيل.

**تشكيل غشائي (Diaphragm Forming)**: تشكيل صفائحي لخلائط فائقة اللّدانة يمكن أن تنفعل بمقدار كبير جداً عند درجات حرارة معيّنة.

**تصدُّع طبقي (Stacking Fault)**: انقطاع طبقي واحد أو اثنين في سلسلة كُدُس البنية البلّورية يتجلّى على شكل تغيّر في سلسلة المواقع المنتظمة للمستويات الذريّة في البنية التكعيبية الممركزة الوجه أو السداسية المتراصة.

**تصعُّد (Sublimation)**: التحوُّل من صلب إلى غاز، أو العكس، من دون المرور بالطَور السائل.

**تعب الدوران (Rolling Fatigue)**: التعب الذي ينشأ في المادة بسبب الدوران، وهو شائع في المحاور وقضبان المرافق في محرّكات الاحتراق الداخلي.

**تغيُّر الشكل مغنطيسياً (Magnetostriction)**: خاصية في المواد المغنطيسية الحديدية المباشرة تسبّب تغيير شكلها حين تطبيق حقل مغنطيسي عليها.

**تقسية بالترسيب (Precipitation Hardening)**: تقسية سطحية حرارية بترسيب طبقة من محلول صلب فائق الإشباع، والهدف منها زيادة مقاومة الخضوع في المواد المطاوعة المكوَّنة من خلائط إنشائية من قبيل خلائط الألمنيوم والمغنيزيوم والنيكل والتيتانيوم والفولاذ غير القابل للصدأ. تسمّى أيضاً التقسية بالتعتيق.

**تقسية بالتشويه (Strain Hardening)**: زيادة القساوة ومقاومة الشدّ في المعدن بالتشويه اللّدن حتى ما بعد نقطة خضوعه، وتحصل هذه التقسية بسبب الانزياحات التي تحصل ضمن البنية البلّورية للمادة.

**تقسية بالتلبيس (Hardfacing)**: تلبيس المادة بطبقة أقسى منها.

**تقسية بالمحلول ( Solution Hardening)**: خلط المادة التي تخضع إلى التقسية بمادة أخرى لتكوِّنا معاً محلولاً صلباً قاسياً.

**تقسية سطحية (Peening)**: سيرورة تقسية للسطح بالتطريق لتحسين الخواص الميكانيكية، وهي عموماً سيرورة تشغيل باردة، إلا حين التقسية السطحية بالليزر.

**تنمية طبقات بلّورية منتظمة (إبِّيتاكسي) (Epitaxi)**: أيُّ تقانة تُنمِّي طبقات بلّورية منتظمة فوق ركيزة أحادية البلّورة.

**تهجير كهربائي (Electrophoresis)**: حركة الجُسيْمات المشحونة كهربائياً في سائل بتأثير الحقل الكهربائي المتولّد بين مسريين مغموسين في المحلول.

**تهشُّش هيدروجيني (Hydrogen Embrittlement)**: اختفاء أو نقصان مطاوعة المادة (الفولاذ غالباً) بسبب تغلغل ذرّات الهيدروجين فيها.

**توضيع الأبخرة فيزيائياً ((Physical Vapor Deposition) (PVD)**: نوع من التوضيع في الخلاء، ويتضمّن مجموعة من طرائق توضيع غشاء رقيق بتكثيف بخار مادة على سطوح مختلفة (من قبيل ركيزة نصف ناقل). وتقوم هذه الطرائق على سيرورات فيزيائية صرفة من قبيل التبخير عند درجات حرارة عالية تحت التخلية أو ترذيذ البلازما بدلاً من التفاعل الكيميائي على سطح الركيزة الذي يحصل في توضيع البخار كيميائياً.

**توضيع الأبخرة كيميائياً (Chemical Vapor Deposition) (CVD)**: سيرورة كيميائية لإنتاج مواد صلبة عالية الجودة شديدة النقاوة. وتُستخدم غالباً في صناعة أنصاف النواقل لصنع أغشية رقيقة. في هذه السيرورة، تُعرَّض ركيزة إلى أبخرة مادة أولية متطايرة أو أكثر تتفاعل و/أو تتفكّك على سطح الركيزة لإنتاج الغشاء المطلوب. وغالباً ما تَنتُج منتجات ثانوية تُزال بتيّار من الغاز الذي يتدفّق عبر حجرة التفاعل.

**توضيع بالتهجير الكهربائي (Electrophoretic Deposition)**: مصطلح يشمل عدداً كبيراً من سيرورات الطلي الكهربائي، والسمة المشتركة بينها هي وجود جُسيْمات معلقة في سائل تهاجر أو تنتقل بتأثير حقل كهربائي وتتوضع على المادة التي تطلى والتي تمثّل أحد مسريي الدارة الكهربائية.

**تيار تحريضي (إدِّي) (Eddy Current)**: تيّار كهربائي يتحرَّض ضمن جسم ناقل حين تعرُّضه إلى حقل مغنطيسي متغير مع الزمن.

**ثابت العزل الكهربائي (Dielectric Constant)**: صفة للعازل الكهربائي تحدّد مقدار الطاقة الكهربائية التي يمكن خزنها في واحدة الحجم من المادة بتطبيق جهد مقداره 1 فولت.

**ثنائي (Diode)**: عنصر إلكتروني ثنائي الأقطاب يسمح للتيار الكهربائي بالمرور في اتجاه واحد فقط.

**ثنائي ضوئي ((LED) Light Emitting Diode)**: ثنائي يُصدر ضوءاً حين مرور تيار عبره.

**جلخ بالصدمة فوق الصوتية (Ultrasonic Impact Grinding)**: جلخ بواسطة أداة غير دوّارة تهتز بتردّدات فوق صوتية وتجعل طيناً مكوّناً من حُبيْبات ناعمة من الرمل يحفر سطح المادة المشغلة مزيلاً المادة منها.

**حاضنة (Matrix)**: وسط يحتوي على شيء أو يتكوَّن الشيء فيه.

**حت ضوئي (Photo Ablation)**: إزالة أجزاء من المادة بواسطة نبضات ليزرية عالية القدرة، والجراحة بالليزر هي نوع من أنواع الحتّ الضوئي.

**حدود حُبيْبية (Grain Boundary)**: منطقة ضيّقة في المادة تفصل بين حُبيْباتها. وهي تمثّل الملتقيات بين الحُبيْبات في المادة المتعدّدة البلّورات، وتمنع حركة الانزياحات عبر المادة، لذا فإن تصغير أحجام البُليْرات يُعتبر طريقة شائعة لتحسين مقاومة الشدّ في المادة. ونظراً إلى كون الحدود الحُبيْبية عيوباً في البنية البلّورية، فهي تؤدّي إلى إضعاف الناقليتين الكهربائية والحرارية. وتكون الذرّات ضمن كل حُبيْبة مرتبة في تشكيلات منتظمة، والوصلة غير المنتظمة بين حُبيْبتين متجاورتين تمثّل الحدود الحُبيْبية.

**حلمهة (Hydrolysis)**: تفكُّك كيميائي بوجود الماء.

**خلائط تذكُّر الشكل (ختشيات) (Shape Memory Alloys) (SMA)**: خلائط تذكُّر الشكل هي فئة جديدة نسبياً من المواد المعدنية ذات الخاصية الفريدة المتمثلة بمفعول تذكُّر الشكل. لقد

أصبحت هذه الخلائط ذات شعبية بسبب خاصية تذكُّر شكلها، أي إن القطعة التي تتشوّه عند درجة حرارة منخفضة سوف تعود إلى شكلها الأصلي حينما تعالج عند درجة حرارة عالية.

**خيطي/ نيماتيك (Nematic)**: صفة لبعض بُنى البلّورات السائلة التي تصطف جُزَيئاتها في خطوط متوازية منفصلة.

**درجة حرارة نيل (Néel Temperature)**: وتُعرف أيضاً بدرجة حرارة الترتيب المغنطيسي، هي درجة الحرارة التي تتحوّل فيها المادة ذات المغنطيسية الحديدية المضادة إلى مادة ذات مغنطة مسايرة .

**دليل الموجة (Waveguide)**: بنية أنبوبية ذات مقطع مستطيل أو دائري يوجه انتقال الموجة عبره، ومن أهم وأقدم أمثلته دليل الأمواج الميكرويّة المستخدم في الرادارات ونظم الاتصالات بالأمواج الميكرويّة. يعتمد شكل مقطع الدليل وأبعاده على طول الموجة واستقطابها.

**دنير (Denier)**: وحدة قياس الكثافة الكتلية الخطية للألياف، وتُعرَّف بكتلة 9000 متر من الخيط بالغرام.

**راد (Rad)**: وحدة إشعاع التشريد الممتصّ، وتكافئ 100 إرغة لكل غرام من المادة المعرّضة للإشعاع.

**ربط تشاركي (Covalent Bonding)**: ربط كيميائي يتميّز بتشارك ذرّات المادتين الموصولتين بأزواج من الإلكترونات.

**ربط تغلغلي (Diffusion bonding)**: طريقة وصل تتضمّن انتقال الذرّات من جزء معدني إلى آخر من طائفة الخليطة نفسها عادة، وذلك لتكوين رابط قوي بينهما.

**ريولوجيا/ علم التدفق (Rheology)**: علم دراسة تدفّق المادة وتشوّهها.

**زحف (Creep)**: ميل المادة الصلبة إلى الانتقال ببطء أو التشوّه الدائم تحت تأثير الإجهادات. ويحصل نتيجة للتعرض الطويل الأمد إلى مستويات من الإجهاد تقل عن مقاومة الخضوع.

**زرع الشوارد (Ion Implantation)**: إشابة المنطقة القريبة من سطح المادة الصلبة بقذفها بحزمة من الشوارد.

**سبينودالي (Spinodally)**: تحويل منظومة غير مستقرة مؤلفة من مكوّنين أو أكثر إلى أطوار مستقرة .

**سحب عميق (Deep Drawing)**: طريقة تشكيل تجعل الصفائح المعدنية على شكل أوعية كالطناجر والعلب وغيرها.

**سمكتيت (Smectite)**: صلصالات معدنية مائية من سليكات الألمنيوم الصفائحية، مخلوطة أحياناً مع مقادير مختلفة من الحديد والمغنيزيوم، ومعادن قلوية وقلوية ترابية.

**سوائلي التبلور (Lyotropic)**: توصف المادة بأنها سوائلية التبلور إذا تكوَّنت منها أطوار بلّورات سائلة حين إضافة مذيب إليها.

**سوائليات (Fluidics)**: تخصُّص هندسي يهتم ببناء تجهيزات تستخدم تدفّق وضغط السوائل في دارات منطقية على غرار الدارات الإلكترونية.

**شدة حقل إزالة المغنطة (شدة الحقل القسري) (Magnetic Coercivity)**: هي شدة الحقل المغنطيسي اللازمة لإزالة المغنطة من مادة كانت قد مُغنطت حتى الإشباع.

**صب بالشمع المهدور (Investment Casting, Lost Wax Casting)**: تقنية تشكيل للمعادن قديمة قدم التاريخ وشمع عسل النحل، يُستخدم فيها الشمع أو راتنج حراري التلدّن لتكوين شكل

القطعة، ويُحاط بطين حراري. وبعد جفاف القالب، يُذاب الشمع بالتمييع الحراري أو الحرق، ويُسكب المعدن المصهور في الفجوة الناتجة.

**طباعة ضوئية (Photolithography)**: سيرورة تُستخدم في التصنيع الميكروي حيث تُزيل جزءاً من غشاء رقيق انتقائياً. ويُستخدم فيها الضوء لنقل أنماط هندسية من قناع ضوئي إلى مادة تتبلمر ضوئياً (انظر المتبلمر بالضوء) على سطح ركيزة. ثم تَحفر سلسلة من المعالَجات الكيميائية المادة المتبلمرة بالضوء مكوِّنة الأشكال المقصود توضيعها على الركيزة.

**طحن كوكبي بالكرات (Planetary Ball Milling)**: طحن بواسطة كرات قاسية من كربيد التنغستين أو الألومينا أو غيرها متوضّعة معاً في مدارات كمدارات الكواكب.

**طريقة الخدش والكسر (Scribe and Break Method)**: خدش المادة بأداة قاسية ثم كسرها على طول الخدش، وهي شائعة كثيراً في تقطيع الزجاج باستخدام أداة الخدش الألماسية.

**طلاء تغطية (Overlay Coating)**: طلاء يغطي المادة المطلية من دون التغلغل فيها والاختلاط معها.

**طلاء تغلغلي (Diffusion Coating)**: طلاء يختلط بالمادة المطلية بالتغلغل عبر سطحها عند درجة حرارة عالية.

**طَور** R **(R Phase)**: طَور من أطوار النيتينول، وهو مرتنزيتي من حيث طبيعته، إلا أنه ليس «المرتنزيت» المسؤول عن مفعول تذكُّر الشكل والمرونة الفائقة. ويتصف التحوُّل من هذا الطَور إلى أوستنيت بأنه عكوس، مع حلقة تباطُؤ ضيّقة جداً (2 ـ 5 مْ عادة). وهو يُبدي مفعول تذكُّر للشكل صغيراً جداً ضمن مجال من درجات الحرارة ضيق جداً أيضاً.

**عدد برينيل للقساوة (Brinell Hardness Number) (BHN)**: انظر «اختبار برينيل للقساوة».

**عزم الغوص (Pitching Moment)**: العزم الذي تولِّده قوة هوائية ديناميكية في جناح طائرة أو زعنفة هوائية حول المحور العرضاني حين تطبيقها على مركز الزعنفة الهوائي الديناميكي. ويمثّل هذا العزم حين تطبيقه على جناح الطائرة جزءاً من العزم الكلي الذي يجب أن يُوازَن باستخدام نظام الاستقرار الأفقي.

**غاز الماء (Water Gas)**: غاز يحتوي على الهيدروجين وأول أُكسيد الكربون، ويُنتَج بتمرير بخار ماء فوق فحم الكوك المسخَّن حتى الاحمرار حيث يحصل التفاعل: ($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$).

**فراكتال (Fractal)**: أنماط هندسية تتكرر في كل مستوى من المقاسات، حيث يُمثَّل كل جزء في مستوى معيّن بالجزء نفسه، مكبَّراً أو مصغَّراً من مستوى آخر. ولذا لا يمكن التعبير عنها بالهندسة الفراغية المعهودة .

**فُلَّرينة (Fullerene)**: طائفة من مغايرات الكربون مكوَّنة من جُزَيئات كربون فقط متجمعة على شكل كرات جوفاء أو أنابيب أو صفائح. سُمِّيت باسم مخترع القبة الجيوديزية المهندس المعماري الشهير بَكمينستر فُلَّر (Buckminster Fuller).

**فوتونيات (Photonics)**: على غرار الإلكترونيات، الفوتونيات هي تقانة الضوئيات الخاصة بتوليد الضوء وإشعاعه ونقله وتعديله ومعالجة الإشارة به وتضخيمه وكشفه وتحسُّسه.

**فونون (Phonon)**: كَمُّ الطاقة الصوتية أو الاهتزازية الميكانيكية الذي يمثّل جسيماً منفصلاً، على غرار الفوتون .

**قذيفة خارقة بالطاقة الحركية (Kinetic Energy Penetrator)**: ذخيرة سلاح لا تحتوي على مواد متفجّرة وتخترق الهدف بطاقتها الحركية.

**قرينة الأُكسجين الحدية (Limiting Oxygen Index)**: هي أدنى تركيز للأُكسجين يُمكِّن من احتراق البوليمر.

**قمط تجعيدي (Crimping)**: طريقة لوصل مادتين معدنيتين أو مواد مطاوعة أخرى بتجعيد إحداهما أو كليهما على بعضهما. أحد أهم تطبيقات هذه الطريقة تثبيت الطلقة النارية بالمحفظة التي تحتوي على المادة المتفجرة.

**كبس بارد متساوي الضغط ((Cold Isostatic Pressing) (CIP)**: طريقة تشكيل تحت ضغط متساوٍ من جميع الاتجاهات في وعاء محكم الإغلاق له الشكل المطلوب يوضع فيه مسحوق المعدن. يتحوَّل المسحوق تحت الضغط من تجمعات منفصلة إلى جسم غض مرصوص كثيف جزئياً ذي مقاومة كافية لتداوله ونقله إلى مراحل المعالجة التالية.

**كبس حار متساوي ضغط (Hot Isostatic Pressing (HIP)**: سيرورة تصنيع تُخفِّض مسامية المعادن وتؤثِّر في كثافة كثير من المواد السيراميكية، فتُحسِّن خواصها الميكانيكية وقابليتها للتشغيل. تتعرَّض القطعة في هذه السيرورة إلى درجة حرارة عالية ضمن غازٍ متساوي الضغط في حجرة مضغوطة. أما أكثر غازات الضغط استخداماً فهو الأرغون. يجب أن يكون الغاز خاملاً كي لا يتفاعل كيميائياً مع المواد التي يجري كبسها. ويُطبَّق الضغط من جميع الاتجاهات كي يكون متجانساً في جميع النقاط.

**كثافة المسحوق المربَّت (Tap density)**: هي الكثافة الظاهرية لمسحوق معدني بعد الهزّ أو التربيت على الوعاء الموجودة فيه.

**كرة بَكّي (Bucky ball)**: فُلَّرينة كروية. انظر «فُلَّرينة».

**متانة (Toughness)**: تعبّر المتانة في علم المواد والتعدين عن مقاومة المواد للكسر عندما تتعرّض للإجهاد، وتُعرّف بأنها كمية الطاقة في واحدة الحجم التي تستطيع المادة أن تمتصها قبل الانهيار، وتقاس بالجول لكل متر مكعب.

**متانة إزاء الكسر (Fracture Toughness)**: مقدار يعبِّر عن مقاومة المادة للكسر الهشّ وذلك عند وجود صدع فيها. عندما تمتلك مادة قيمة عالية للمتانة إزاء الكسر فهذا يعني أنها على الأرجح سوف تخضع لكسر ليّن أو مطاوع. في حين أن الكسر الهش هو سمة مميزة للمواد ذات القيم المنخفضة للمتانة إزاء الكسر. وتقاس المتانة إزاء الكسر بالباسكال م$^{1\backslash 2}$ .

**متانة الليف (Tenacity)**: القيمة العظمى لمقاومة الليف أو الخيط للشدّ التي يحصل عندها الانقطاع وتُقدَّر بالغرام الثقلي/ دِنير.

**متبلمر بالضوء (Photoresist)**: مادة حساسة للضوء تُستخدم في الطباعة الضوئية والحفر الضوئي في مجالات مختلفة، أهمها الرقاقات الإلكترونية، لصنع أشكال دقيقة. وتُصنَّف هذه المواد في فئتين: موجبة وسالبة. في الموجبة، يُصبح الجزء الذي يتعرَّض للضوء قابلا للانحلال بواسطة المُظهِر، أما الجزء الذي لا يتعرَّض إلى الضوء فيبقى غير قابل للانحلال به. وفي السالبة، يصبح الجزء المتعرِّض إلى الضوء غير قابل للانحلال، في حين أن الجزء الذي لا يتعرَّض إلى الضوء يكون قابلاً للانحلال بالمُظهِر.

**متعدّد المعادن (Intermetallic)**: مادة صلبة مكوَّنة من أطوار معدنية متعدّدة مختلفة، تشتمل على تلك المتداخلة المتدرِّجة التركيب والملحومة والملؤومة وغيرها باستثناء الخلائط المتجانسة التركيب.

**متغاير (Allotrope)**: صيغة من العنصر نفسه مختلفة من حيث بنيتها الجُزَيئية. مثلاً، الغرافيت والألماس والفلَّرينات هي من متغايرات الكربون.

**مُحِسّ (Sensor)**: أداة تقيس المقدار الفيزيائي وتعطي إشارة يمكن قراءتها من قبل شخص أو جهاز قياس. من أمثلته مقياس الحرارة والميكروفون ومقياس الضغط.

**محفّز ثلاثي المفعول (Three-Way Catalyst)**: محفّز كيميائي يُستخدم في محرّكات الاحتراق الداخلي ليُحوِّل فوراً أكاسيد الآزوت وأول أُكسيد الكربون والهيدروكربونات والفورم ألدهيد التي تُعدُّ ملوثات خطيرة للهواء إلى بخار ماء وثاني أُكسيد الكربون وآزوت.

**مِحَمّ (Autoclave)**: جهاز يُسخِّن المادة إلى ما فوق درجة حرارة غليانها، ويُستخدم لصنع المواد الكيميائية أو لتعقيم أدوات العمليات الجراحية.

**مِحوال (Transducer)**: أداة كهربائية أو إلكترونية أو كهروميكانيكية أو إلكترومغنطيسية أو ضوئية أو كهروضوئية تُحوِّل أي نوع من الطاقة إلى نوع آخر.

**مدة الإمساك (Holding Time)**: مدة بقاء شيء في حالة ما.

**مرتبة كِبَر (Order of Magnitude)**: مرتبة كِبَر المقدار هي لوغاريتمه العشري. أي إذا كانت قيمة المقدار من رتبة الألف، كانت مرتبة كِبَره تساوي 3. وإذا كان المقدار أ أكبر من المقدار ب بألف مرة، كان أكبر منه بثلاث مراتب كبر.

**مرتنزيت (Martensite)**: المقصود بالمرتنزيت، المشتقة من اسم عالم المعادن الألماني (Adolf Martens) الذي عاش بين العامين

(1850 ـ 1914)، بنية الفولاذ المتبلورة الشديدة القساوة، ويُمكن استخدامها أيضاً لوصف أي بنية بلّورية مشكَّلة بالتحويل الانزياحي. يتكوَّن المرتنزيت بالتبريد السريع للأوستنيت حيث تُحتجز ذرّات الكربون التي لا يتوفّر لها الوقت للخروج من البنية البلّورية. يبدأ هذا التحوُّل المرتنزيتي في أثناء التبريد عندما يبلغ الأوستنيت درجة حرارة بدء المرتنزيت ويُصبح الأوستنيت الأب غير مستقر ميكانيكياً. وعند درجة حرارة ثابتة أقل من تلك الدرجة يتحوّل جزء من الأوستنيت الأب بسرعة، ولا يحصل أي تحول آخر بعدئذ. وحين انخفاض درجة الحرارة يتحول مزيد من الأوستنيت إلى مرتنزيت. وعند درجة انتهاء التحوّل يكون كل الأوستنيت قد أصبح مرتنزيت. يتصف المرتنزيت ببنية تكعيبية ممركزة الجسم.

**معامل تركيز الإجهادات الحدي (Coefficient of Stress Concentration)**: الإجهاد الذي يحصل الكسر عنده.

**معامل الحَنِي (Flexural Modulus)**: قابلية المادة للحني، وتُعطى بنسبة الإجهاد إلى الانفعال في تشوّه الحني .

**مُعَامل القص (Shear Modulus)**: نزوع المادة إلى القص (التشوُّه عند حجم ثابت) حين تعرُّضه لقوى متعاكسة، ويُعرَّف بإجهاد القصّ مقسوماً على انفعال القصّ. معامل القص على صلة وثيقة بلزوجة المادة.

**مُعَامل المرونة (Elastic Modulus)**: هو الوصف الرياضي لنزوع المادة إلى التشوُّه المرن (غير الدائم) حين تطبيق قوة عليه، ومن أمثلته ما يحصل في النوابض. ويُعطى بنسبة الإجهاد إلى الانفعال، أي بميل منحني الإجهاد كتابع للانفعال (التشوُّه) في منطقة التشوُّه المرن.

**مُعَامل يونغ (Young's Modulus)**: يصف مرونة الشدّ أو ميل المادة إلى التشوُّه على طول محور حين تطبيق قوى شدّ متعاكسة مسايرة لذلك المحور. ويُعرَّف بنسبة إجهاد الشدّ إلى انفعال الشدّ. وغالباً ما يُشار إليه بمعامل المرونة.

**مغنطيسية حديدية مباشرة (Ferromagnetism)**: هي النوع الأساسي للمغنطيسية التي تتحوَّل فيها مواد معيّنة من قبل الحديد إلى مغانط دائمة و/أو تبدي تأثيرات متبادلة قوية مع المغانط، وتتجلى في معظم الظواهر المغنطيسية التي نصادفها في حياتنا اليومية.

**مغنطيسية حديدية معاكسة (Antiferromagnetism)**: في هذا النوع من المغنطة تكون العزوم المغنطيسية للذرّات أو الجُزَيئات، ذات الصلة بسبينات الإلكترونات، مصطفة في أنماط منتظمة تكون فيها السبينات المتجاورة متعاكسة الاتجاهات.

**مغنطيسية مسايرة (Paramagnetism)**: هي المغنطيسية المؤقتة التي تحصل بوجود حقل مغنطيسي خارجي.

**مفعول الصوت الضوئي (Photoacoustic Effect)**: هو تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة صوتية بسبب امتصاص الطاقة الضوئية وظهور الإثارة الحرارية. حين سقوط نبضات سريعة من الضوء على المادة، يمكن أن تمتصها وأن تعيد إصدارها على شكل حرارة. وتسبب هذه الحرارة أمواجاً صوتية قابلة للكشف بسبب تغيّرات الضغط الناجم عن إصدار الحرارة. يُستخدم مفعول الصوت الضوئي في التحليل الطيفي.

**مفعول فينتوري (Venturi Effect)**: انخفاض ضغط السائل الناجم عن مروره عبر مقطع ضيق من أنبوب.

**مقاومة الانفراغ الكهربائي (Arc Resistance)**: مقاومة المادة لحدوث قوس كهربائية عبرها عند تطبيق جهد كهربائي عليها.

**مقاومة التعب (Fatigue Strength)**: هو الإجهاد الأعظمي الذي يمكن للمادة أن تتحمله على مدى عدد معيّن من دورات التحميل من دون أن تنهار، حيث يُعكس الإجهاد كلياً ضمن كل دورة.

**مقاومة الحقل الكهربائي (Dielectric Strength)**: أعلى قيمة للحقل الكهربائي يمكن لعازل أن يتحمله قبل أن ينهار.

**مقاومة الحَنِي (Flexural Strength)**: تُعرَّف بقابلية مادة هشّة لمقاومة التشوّه تحت الحمل، ويُستخدم لتحديدها اختبار الحَنِي العرضاني الذي يحني عيّنة من المادة على شكل قضيب دائري أو مربع المقطع حتى تنكسر باستخدام تقنية النقاط الثلاث. وتمثّل مقاومة الحَنِي الإجهاد الأعظمي الذي تتحمله المادة عند لحظة الانهيار .

**مقاومة الخضوع (Yield Strength)**: تُعرَّف مقاومة المادة للخضوع بالإجهاد الذي تبدأ عنده بالتشوُّه اللدن.

**مقاومة الشدّ (Tensile Strength)**: أكبر إجهاد شدّ تتحمله المادة من دون أن تتمزق أو تنقطع أو تنهار.

**مقاومة الصهارة (Melt strength)**: القيمة العظمى للشدّ الذي يمكن أن يُطبّق على الصهارة من دون أن تنقطع الصهارة اللزجة أو تتمزّق .

**مقاومة الضغط (Compressive Strength)**: مقدرة المادة على تحمُّل قوى دافعة محورياً. وعند بلوغ الحمل الحد الأقصى للمقاومة، تنهار المادة ونسمي قيمة الإجهاد عندها مقاومة الضغط.

**مقاومة في الحالة الغضّة (الطرية) (Green Strength)**: مقاومة السيراميك للشدّ وهو في الحالة الطرية (أي قبل التلبيد).

**مقاومة القص (Lap Shear)**: الإجهاد الموجود بين الوصلات المتراكبة.

**مقاومة كهربائية حجمية (Volume Resistivity)**: المقاومة الكهربائية بين وجهين متقابلين لمكعب طول ضلعه 1 سم من مادة عازلة، وتقدر بالأوم سنتيمتر .

**مقاومة نوعية (Specific Strength)**: مقاومة الشدّ في المادة (قوة على واحدة المساحة حين الانهيار) مقسومة على كثافتها.

**مونومر (وحيد الجُزَيء) (Monomer)**: جُزَيء صغير يمكن أن يتَّحد كيميائياً مع وحيدات جُزَيء أخرى لتكوين بوليمر (متعدّد جُزَيئات).

**ميكانيك الأوساط المستمرة (Continuum Mechanics)**: فرع من الميكانيك يُحلِّل الظواهر الحركية والسلوك الميكانيكي للمواد بوصفها أجساماً مستمرة تملأ المادة فيها الحيّز الذي تحتله كلياً، لا بوصفها جُزَيئات وجُسيْمات وحُبيْبات.

**ميكانيك الكسر (Fracture Mechanics)**: تقنية لتحليل الكسر تُستخدم لتحديد مستوى الإجهاد الذي سوف تنتشر عنده الصدوع الموجودة مؤدّية إلى حصول الكسر.

**ميناء (Glaze)**: طبقة قاسية لماعة وشفافة تشابه الزجاج وتُصهر على السيراميك لتلوينه أو تزيينه أو تقويته أو حمايته.

**ناقلية قذفية (Ballistic Conductance)**: ظاهرة تمر فيها الإلكترونات عبر ناقل من دون تسخينه.

**نسيقة (Module)**: كينونة مستقلة قابلة للتكرار.

**نصف الناقل القائم على متمم أُكسيد المعدن (سيموس) (Complementary Metal Oxide Semiconductor) (CMOS))**: تقانة لصنع الدارات الإلكترونية المتكاملة من قبيل المعالجات والمتحكّمات الصغرية والذواكر والدارات المنطقية الأخرى. وتُستخدم أيضاً لصنع الدارات التماثلية الخاصة بمُحِسَّات التصوير والمبدلات التماثلية الرقمية ونظم الاتصالات اللاسلكية.

**نضوج أوستفالد (Ostwald Ripening)**: نزوع قُطْر تجمُّع من الجُسيْمات إلى النمو مع الزمن على حساب تجمُّعات أصغر بسبب قابليتها للانحلال العالية، وهذا ما يؤدّي إلى تبلور جُسيْمات أكبر فأكبر.

**نقطة كمومية (Quantum Dot)**: هي نصف ناقل تكون فيه أزواج الإلكترونات والثقوب محصورة في جميع الأبعاد الثلاثة. ونتيجةً لذلك تكون خواصه بين تلك التي لنصف الناقل وتلك التي للجُزَيئات المنفصلة، وهذا ما يؤدّي إلى تغيّر الخواص تغيراً ملحوظاً حين إضافة إلكترون إليه أو نزعه منه.

**نيتينول (Nitinol)**: خليطة متوازنة من النيكل والتيتانيوم.

**هوائي الصفيفة الطَورية (Phased Array Antenna)**: هوائي مكوّن من عدد من الهوائيات الجزئية المرتبة في صفيفة، وتتحدّد فيه أنماط الإشعاع بالمطالات والأطوار النسبية للتيارات التي تمر في تلك الهوائيات الجزئية. أهم استخدامات هذا الهوائي في الرادارات لتحقيق توجيهية عالية.

**وصلة نفقية (Tunnel Junction)**: أي وصلة بين مادتين مختلفتين تعبرها الإلكترونات وفقاً لظاهرة النفق الكمومية.

**ياغ (Yag: Yttrium Aluminium Garnet)**: مادة بلّورية تركيبية تنتمي إلى مجموعة العقيق الأحمر، وتُستخدم في الليزرات. وتركيبها هو $Y_3Al_5O_{12}$.

**يوتِكتي/ أصهري (Eutectic)**: تعتمد درجة حرارة مزيج من مادتين صلبتين أو أكثر على نِسَب مكوّنات المادة. والمزيج اليوتكتي هو الذي يتكوَّن من مواد نِسَبها تجعل درجة حرارة انصهار المزيج أصغرية محلياً، أي إن جميع مكوّنات المادة تتبلور آنياً عند درجة الحرارة هذه من السائل المصهور. يُسمّى هذا التبلور المتزامن بالتفاعل اليوتكتي، وتُسمى درجة الحرارة التي يحصل ذلك عندها بدرجة الحرارة اليوتكتية.

# ثبت المصطلحات: عربي ــ إنجليزي

| | |
|---|---|
| آلية توليد ونقل الحركة | Powertrain |
| أجوف | Hollow |
| أحادي الميل | Monoclinic |
| احتكاك التصاقي | Stiction (Friction and Sticktion) |
| إخفاق/ انهيار | Failure |
| إرجاع | Reduction |
| إزالة الرابط | Debinding |
| استجابة (فعالية) | Reactivity |
| استقراء | Extrapolation |
| استقطاب كهربائي | Ferroelectricity |
| استمثال | Optimization |
| استنزاف | Leaching |
| أسطوانة مائية | Plume |
| اسم تجاري لسبيكة نيكل ـ كروم ـ حديد | Inconel |
| إشابة | Doping |
| أشعّة سينية | X-ray |
| إصدار حقلي | Field Emission |
| أصهري (يوتكتي) | Eutectic |
| أغار (هلام الطحالب الحمراء) | Agar |
| أغطية الصمّامات الهزازة | Rocker Covers |

| | |
|---|---|
| إكساء/ تغليف/ تلبيس | Cladding |
| أكسدة | Oxidation |
| أكسدة متدرّجة | Progressive Oxidation |
| إكسيتون (إلكترون ـ ثقب) | Exciton |
| أليف | Philic |
| أليف للماء | Hydrophilic |
| أليفاتي | Aliphatic |
| امتزاز | Adsorption |
| أمثال التفاعل الكيميائي | Stoichiometry |
| أنبوب بَكِّي | Bucky Tube |
| أنبوب شبكي | Stem |
| إنبيق | Retort |
| إنتاج كمي | Mass Production |
| إنتاجية/ حصيلة/ طراوة/ مطاوعة/ خضوع | Yield |
| انتقال (تحول) طوري | Phase Transformation |
| اندماج/ دمج | Fusion |
| انعراج | Diffraction |
| انفصام، انزياح | Dislocation |
| انفعال، تشوُّه | Strain |
| أنيبوب: أنبوب صغير | Tubule |
| اهتراء بالتغبُّر | Dusting Out |
| اهتراء المعادن بالاحتكاك | Galling |
| اهتراء المعادن بالاحتكاك وبالتأكل بوجود الماء | Seizing |
| أوستنيت | Austenite |
| أوليغومر | Oligomer |
| بئر كمومية | Quantum Well |

| | |
|---|---|
| Bit | بت (رقم اثناني)/ ريشة تثقيب |
| Extrusion | بثق |
| Pultrusion | بثق بالسحب |
| Coextrusion | بثق مشترك |
| Prion | برايون (شبه فيروس) |
| Rivet | برشامة (تبشيمة) |
| Bolt | برغي/ مسمار |
| Anthropomorphic | بشري الشكل |
| Primary Battery | بطارية غير قابلة للشحن |
| Bushing | بطانة |
| Liner | بطانة |
| Pixel | بكسل (عنصر صورة) |
| Plasmatron | بلازماترون |
| Plasmon | بلازمون |
| Equiaxed Crystals | بلّورات متساوية الأطوال المحورية |
| Crystal | بلورة |
| Crystallite | بُلَيْرة |
| Architecture | بنيان |
| Dendrite | بنية شبه شجرية |
| Biomorph | بنية شبيهة بالأحياء |
| Poise (1 P = 1 g $cm^{-1}$ $s^{-1}$) | بواز (واحدة اللزوجة) |
| Polymer | بوليمر (كثير الجُزَيئات) |
| Prepolymer | بوليمر أولي |
| Ionomer | بوليمر شاردي |
| Fluoropolymer | بوليمر فلوريني |
| Homopolymer | بوليمر متجانس |

| | |
|---|---|
| High Polymer | بوليمر متقدّم |
| Copolymer | بوليمر مشترك |
| Block Copolymer | بوليمر مشترك تعاقبي |
| Electroactive Polymer | بوليمر مفعّل كهربائياً |
| Greenhouse | بيت زجاجي |
| Intergranular | بين الحُبيْبات |
| Luminescence | تألّق |
| Flash Evaporation | تبخير جزئي |
| Switching | تبديل |
| Quenching | تبريد سريع (سقاية) |
| Drilling | تثقيب |
| Boring | تجويف |
| Friction Stir | تحريك احتكاكي |
| Thermolysis | تحطيم حراري |
| Thermogravimetry | تحليل حراري وزني |
| Swaging | تخصير |
| Percolation | تخلُّل |
| Outgassing | تخلية من الغازاتظ طرد الغازات |
| Damping | تخميد |
| Passivation | تخميل |
| Plastic Flow | تدفّق لدن |
| Viscous Flow | تدفّق لزج |
| Recycling | تدوير |
| Gyration | تدويم |
| Atomizing | تذرير |
| Frequency | تردّد |

| | |
|---|---|
| Sputtering | ترذيذ |
| Precipitation | ترسيب |
| Osteolysis | ترقّق العظام |
| Shear Thinning | ترقُّق ناجم عن القص |
| Sedimentaion | ترقيد |
| Synthetic | تركيبي |
| Amorphization | تزجُّج |
| Glazing | تزجيج |
| Resistive Heating | تسخين المقاومة الكهربائي |
| Infiltration | تسريب |
| Infusion | تسريب/ نقع/ حقن |
| Flattening | تسطيح/ تسوية |
| Deflashing | تشذيب |
| Impregnation | تشريب |
| Spallation | تشظي |
| Irradiation | تشعيع |
| Sublimation | تصعُّد |
| Cure | تصليد/ شيّ/ إنضاج |
| Tomography | تصوير مقطعي/ طبقي |
| Synergy | تضافر/ (طاقة العمل الجماعي) |
| Volatilization | تطاير/ تبخر |
| Tempering | تطبيع |
| Annealing | تطرية حرارية |
| Forging | تطريق |
| Grafting | تطعيم |
| Fatigue | تعب |

| | |
|---|---|
| Aging | تعتيق |
| Denature | تعديل الخواص الطبيعية |
| Metallurgy | تعدين/ علم المعادن |
| Overhual | تعمير/ صيانة دورية |
| Caldding | تغطية/ إكساء |
| Dipping | تغطيس |
| Diffusion | تغلغل |
| Magnetostriction | تغيُّر الشكل مغنطيسياً |
| Reactive | تفاعلي/ قابل للتفاعل |
| Milling | تفريز/ طحن |
| Pyrolysis | تفكيك حرارياً |
| Exfoliation | تقشُّر |
| Peening | تقوية سطحية |
| Rectification | تقويم |
| Condensation | تكاثف |
| Valence | تكافؤ |
| Densification | تكثيف |
| Calcination | تكليس |
| Spheroidization | تكوير |
| Sintering | تلبيد |
| Electroplating | تلبيس كهربائي |
| Thixotropic | تميُّع بالرج/ تيكسوتروبي |
| Axisymmetric | تناظر أسطواني |
| Endoscopic | تنظيري |
| Growth | تنمية |
| Epitaxy | تنمية بلّورية طبقية منتظمة على ركيزة متبلورة |

| | |
|---|---|
| Thermophoresis | تهجير حراري |
| Equilibrium | توازن |
| Planar | ثنائي الأبعاد/ مستوي |
| Bimorph | ثنائي الشكل |
| LED (Light Emitting Diode) | ثنائي مشع للضوء |
| Bimetal | ثنائي المعدن |
| Diode | ثنائي نصف ناقل |
| Braiding | جدْل |
| Radical | جذر |
| Laproscopic | جراحي تنظيري |
| Supramolecule | جُزَيء ضخم |
| Stiffness | جساءة |
| Green Body | جسم طري |
| Particle | جُسيْم |
| Macroscopic/ Monolithic | جَسِيم/ جهري |
| Grinding | جلخ/ طحن |
| Specie | جنس |
| Matrix | حاضنة/ مصفوفة |
| Solid State | حالة صلبة |
| Shield | حجاب |
| Gemstone | حجر كريم |
| Boundary | حدود |
| Cast Iron | حديد صب |
| Thermoset | حراري التصلد |
| Thermoplastic | حراري التلدّن |
| Thermoelastic | حراري المرونة |

| | |
|---|---|
| Burnout | حرق |
| Binder Burnout | حرق (إزالة الرابط) |
| Rayon | حرير صناعي |
| Filler | حشوة/ مالئ |
| Confinement | حصر/ انحصار |
| Injection | حقن |
| Rubbing | حك بالمسح |
| Hysteresis | حلقة تباطؤ |
| Heterocycle | حلقة مغايرة |
| Hydrolysis | حلمهة |
| Ballistic Protection | حماية من الطلقات النارية |
| Convection (Thermal) | حَمل (حراري) |
| Knitting | حياكة |
| Abalone | حيوان أذن البحر |
| Surfactant | خافض التوتر السطحي/ عامل تبليل |
| Preform | خامة تشكيل |
| SMA: Shape Memory Alloy | ختش (خليطة تذكُّر الشكل) |
| Scribing | خدش |
| Notched Impact | خدش بالصدم |
| Turning | خراطة |
| Staple | خُرْزة |
| Nematic | خطي/ نيماتيك |
| Alloying | خلط |
| Clearance | خلوص |
| Fuel Cell | خلية وقود |
| Buffer | دارئ |

| | |
|---|---|
| Thrust | دفع |
| Waveguide | دليل موجة |
| Stamping | دمغ |
| DNA | دنا (الحمض النووي الريبي المنقوص الأُكسجين) |
| Denier | دنير |
| Submicron | دون ميكروي |
| Aerodynamic | ديناميك هوائي |
| Flash Memory | ذاكرة ومضية |
| Sacrificial | ذوَّاب/ مهدور |
| Tetragonal | رباعي الوجوه |
| Bond | ربط |
| Slip | رداغ/ طين/ معلَّق |
| Compaction | رصّ |
| Chip | رقاقة |
| Flip Chip | رقاقة تلحم مباشرة على الدارة |
| Substrate | ركيزة |
| Bar Code | رماز قضباني |
| Ribosome | ريباسة |
| Creep | زحف |
| Prosthesis | زرع الأعضاء |
| Pitch | زفت |
| Flashes | زوائد |
| Stator | ساكن |
| Maglev (Magnetic Levitation) | سباحة مغنطيسية في الهواء |
| Ingot | سبيكة |
| Spinodal | سبينودالي |

| | |
|---|---|
| Soot | سخام |
| Warp | سَداة |
| Blasting | سفع |
| Ratchet | سقاطة |
| Nanoimprinting | سك نانوي |
| Scale | سلَّم |
| Tolerances | سماحيات |
| Permittivity | سماحية |
| Smectite | سمكتيتي |
| Centipoise = $10^{-2}$ Poise | سنتيبواز |
| Anvil | سندان |
| Lyotropic | سوائلي التبلور |
| Fluidics | سوائليات |
| Biofluidics | سوائليات حيوية |
| Siboramic ($SiBN_3C$) | سيبورامي (سيراميك السليكون والبورون) |
| Belt | سيْر |
| Conveyor Belt | سيْر النقل |
| Piezoceramic | سيراميك كهروضغطي |
| CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) | سيموس (نصف الناقل القائم على متمم أُكسيد المعدن) |
| CMOL (CMos, MOLecule) | سيمول (سيموس ـ جزيء) |
| Anion | شاردة سالبة |
| Cation | شاردة موجبة |
| Grating | شبكة |
| Stent | شبكة أنبوبية |
| Neural Network | شبكة عصبونية |

| | |
|---|---|
| Pseudoplastic | شبه لدن |
| Tensile | شد |
| Magnetic Coercivity | شدة حقل إزالة المغنطة |
| Cryogenic | شديد البرودة |
| Wafer | شُراحة |
| Whisker | شعيرة |
| Flange | شفة |
| Near Net Shape (NNS) | شكل شبه نهائي |
| Tow | شلة/ حزمة غير مجدولة من الألياف |
| Spark Plug | شمعة إشعال |
| Casting | صب |
| Susceptor | صحن تسخين الركيزة |
| Crack | صدع/ تشقّق |
| Bottom Up | صعودي |
| Lamella | صفيحة |
| Bipolar Plate | صفيحة مزدوجة القطبية |
| Array | صفيفة |
| Lapping | صقل |
| Clay | صلصال/ غضار |
| Melt | صُهارة |
| Smelting | صهر (استخراج المعدن من الخام) |
| Flux | صُهور/ سيالة |
| Sonar | صوتي تحت مائي |
| Turbocharger | ضاغط هواء محرّك الاحتراق الداخلي |
| Intragranular | ضمن الحُبيْبات |
| Primer | طبقة تحضيرية/ تمهيدية لطلاء أو للاصق |

| | |
|---|---|
| Die | طبقة/ شريحة/ قالب/ لقمة قلوظة/ قلم خراطة |
| R phase | الطَور R |
| Interphase | طور بيني |
| Mesophase | طور وسطي |
| Sealing Ring | طوق إحكام |
| Cantilever | عارضة بارزة |
| Thermal Barrier | عازل حراري |
| Seamless | عديم الوصلات |
| Nut | عزقة/ صمولة |
| Axonic | عصبوني |
| Aromatic | عطري |
| Tribology | علم الاحتكاك والتزليق |
| Rheology | علم التدفق/ الريولوجيا |
| Crankshaft | عمود المَرافق |
| Shaft | عمود/ قضيب/ محور |
| Disclination | عيب تناظر دوراني |
| Graphaitization | غرفتة |
| Electrospinning | غزْل كهربائي |
| Spin | غزل/ تدويم |
| Hemodyalysis | غسيل الكلى |
| Thin Film | غشاء رقيق |
| Metastable | غير مستقر/ توازن حرج |
| Supersaturated | فائق التشبع |
| Superplastic | فائق اللّدانة |
| Spacer | فاصل مسافة |
| Fuse | فاصمة حرارية |

| | |
|---|---|
| Crevice | فتحة/ شق |
| Nondestructive Examination | فحص لاإتلافي |
| Char | فحم |
| Fractal | فراكتال |
| Fluid Bed | فرشة مسيّلة |
| Decoding | فك الترميز |
| Washer | فَلْكة (رنديلة) |
| Fullerenes | فُلَّرينات |
| Fluorescence | فَلْوَريّة/ تألق بالفَلْورة |
| PH steel (Precipitation Hardened Steel) | فولاذ مقسًّى بالترسيب |
| phonon | فونون |
| Nozzle | فوهة/ منفث |
| Vickers | فيكرز |
| Upright | قائم |
| Clutch | قابض |
| Paraelectric | قابل للاستقطاب كهربائياً |
| Wettability | قابلية التبلّل |
| Lubricity | قابلية التزليق |
| Diffusivity | قابلية التغلغل |
| Dispensability | قابلية التوزيع |
| Solid Solubility | قابلية ذوبان (انحلال) الحالة الصلبة |
| Coupling | قارنة |
| Gripper | قبضة/ مقبض |
| Preimpregnated | قبْلي التشريب |
| Triggering | قَدْح |
| Ballistic | قذفي |

| | |
|---|---|
| Blisk (Bladed Disk) | قرص عنفة متكامل مع الشفرات |
| Hardness | قساوة |
| HV (Vickers Hardness) | قساوة فيكرز |
| Core Hardness | قساوة اللب |
| Shear | قص |
| Mandrel | قضيب/ عمود/ تشكيل |
| Rotor | قلب دوار |
| Crimping | قمط تجعيدي |
| Hopper | قمع تلقيم |
| Van der Waals Attraction | قوة فان در فالس |
| Arc | قوس (كهربائية) |
| Molding | قولبة |
| X-ray Diffractometry | قياس انعراج الأشعّة السينية |
| Flow Porometry | قياس التدفّق المسامي |
| Calorimetry | قياس كمية الحرارة |
| Porosimertry | قياس المسامية |
| Photodetector | كاشف ضوئي |
| Bulky | كتل/ جَسِيم |
| Tap density | كثافة المادة المرصوصة |
| Carburizing | كربدة (تكوين الكربيدات) |
| Pyrocarbon | كربون حراري |
| Carbohydrate | كربوهيدرات (سكريات ـ نشويات) |
| Bucky Ball | كرة بَكِّي |
| Trackball | كرة الملاحقة |
| Fracture | كسر |
| Caliper/Calliper | كماشة |

| | |
|---|---|
| Quantum | كمومي |
| Electrostatic | كهروساكن |
| Piezoelectric | كهروضغطي |
| Electrolyte | كهروليت |
| Fused Quartz | كوارتز مصهور (مادة غير متبلورة) |
| Colloidal Chemistry | كيمياء الغرويات |
| Chiral | لاانطباقي |
| Anisotropy | لاتناحي |
| Brazeing | لأم |
| Amorphous | لامتبلور |
| Block | لبِنة/ كتلة |
| Welding | لحام |
| Plasticity | لدانة |
| Plastic | لدائن |
| Tag | لصيقة |
| Tapping | لولبة (فتح سن) |
| Excimer | ليزر فوق بنفسجي |
| Fiber | ليف كفلار |
| Kevlar Fiber | ليف كفلار |
| Fibril | لُيَيْف: ليف دقيق (قطره 1 نانومتر) |
| Prepreg Material | مادة تقوية أولية |
| Cermet (CERamic-METal) | مادة سيراميكية معدنية |
| Gasket | مانع تسرب |
| Seal | مانع تسرب/ إطار إحكام |
| Toughness | متانة |
| Tenacity | متانة الليف أو الخيط (غرام ثقلي/ دِنير) |

| | |
|---|---|
| Hetero- | متباين |
| Heterogeneous | متباين الخواص |
| Photoresist | متبلمر بالضوء |
| Mutant | متحوِّر |
| Colinear | متسامت/ موازي |
| Isothermal | متساوي الحرارة |
| Equiatomic | متساوي الذرّات |
| Warp Interlocks | متشابكات الأسدية |
| Intermetallic | متعدّد المعادن |
| Allotropic | متغاير |
| Penetrant | متغلغل |
| Reactant | متفاعل |
| Isotropic | متناحي |
| Isostatic | متوازن/ متساوي |
| Orthorhombic | متوازي المستطيلات/ موشور قائم بقاعدة مستطيلة |
| Inhibitor | مثبط/ صاد |
| Runner System | مجرى الصب |
| Microscopic | مجهري/ ميكروي |
| Enthalpy | محتوى حراري |
| Sensor | مُحِس |
| Catalyst | محفِّز |
| Capsule | محفظة |
| Bucky Capsule | محفظة بَكِّي |
| Dilute Solution | محلول ممدد |
| Sol-Gel (Solution to Gel conversion) | محلول ـ هلام (تحويل محلول إلى هلام) |

| | |
|---|---|
| In situ (in the Reaction Mixture) | محلي (ضمن مزيج التفاعل) |
| Bearing | محمَل |
| Autoclave | محِمّ |
| Transducer | محوال |
| Flowchart | مخطط انسيابي |
| Solvent | مذيب |
| Order of Magnitude | مرتبة كِبَر |
| Martensite | مرتنزيت |
| Compound | مركّب |
| Superelasticity | مرونة فائقة |
| Lubricant | مزلّق |
| Lean mixture | مزيج فقير بالوقود |
| Foundry | مَسْبكة (ورشة السباكة) |
| Powder | مسحوق |
| Synchrotron | مسرع إلكترونات تزامني/ سينكروترون |
| Dispersant | مشتِّت |
| Anode | مصعد |
| Elastomer | مطّاط (مطّاطيات) |
| Malleable | مطاوع |
| Ductility | مطاوعة/ ليونة |
| Microprocessor | معالج صغري |
| Processing | معالجة |
| Coefficient | معامل |
| Modulus | معامل |
| Complex | معقّد كيميائي |
| Slurry | معلّق (طينيّ القوام)/ ملاط |

| | |
|---|---|
| Coagulated Slurry | معلّق متخثر |
| Flame Retardant | معيق للهب |
| Rhombohedral | معيَّني |
| Diamagnetism | مغنطيسية عكسية |
| Ferromagnetism | مغنطيسية حديدية |
| Antiferromagnetism | مغنطيسية حديدية مضادة |
| Paramagnetism | مغنطيسية مؤقتة (مسايرة) |
| Latching Sswitches | مفاتيح قلابة |
| Actuator | مفعِّل |
| Domino Effect | مفعول التداعي |
| Size | مقاس/ حجم |
| Refractory | مقاوم للحرارة |
| Strength | مقاومة |
| Connector, Jack | مقبس |
| Damping Capacity | مقدرة تخميدية |
| Wrought | مقسَّى، مطرَّق |
| Clamp | مقمط |
| Standard | مِقيَس |
| Brake | مكبح |
| Plasticizer | ملدِّن |
| Interface | ملقى/ ملتقى |
| Proprietary | ملكية خاصة/ متخصِّص/ مخصَّص |
| Dilutant | ممدِّد |
| Rack | منصب |
| Fuzzy Logic | منطق ترجيحي |
| Pacemaker | منظم نبض القلب |

| | |
|---|---|
| ASTM | منظمة مقاييس المواد واختباراتها الدولية (الأميركية) |
| Cathode | مهبط |
| Metamaterial | مواد استثنائية الخصائص (فائقة) |
| Stabilizer | موازن/ مثبّت |
| Parameter | موسِط |
| Superconductor | موصل/ ناقل فائق |
| Monomer | مونومر |
| Resolution | ميز (دقة الفصل) |
| Glaze | ميناء |
| Exotherm | ناشر للحرارة |
| Nanoscopic | نانوي المقاس |
| Bump | نتوء/ وسادة/ انتفاخ |
| Dispersion | نثر/ منثور/ تشتيت |
| Dehydrogenation | نزع الهيدروجين |
| Top Down | نزولي |
| Aspect Ratio | نسبة بُعدية (نسبة الطول إلى العرض) |
| w/w = Mass Percentage | نسبة مئوية كتلية |
| Weave | نسيج |
| Module | نسيقة |
| Modular | نسيقي |
| Active | نشِط |
| Semiconductor | نصف ناقل/ شبه موصل |
| Random Access | نفاذ عشوائي |
| Permeability | نفاذية |
| Permeable | نَفوذ |
| Phobic | نفور |

| | |
|---|---|
| Hydrophobic | نفور من الماء |
| Quantum Dot | نقطة كمومية |
| Specific | نوعي |
| Nitinol | نيتينول |
| Mote | هباء |
| Aerosol | هباب (معلّقات هوائية) |
| Particulate | هَباب/ جُسيْم منفصل |
| Degradative | هدَّام |
| Gel | هلام |
| Pneumatic | هوائي/ غازي |
| Hydroxide | هيدروكسيد |
| Airframe | هيكل الطائرة أو الصاروخ (هيكل الجسم الطائر) |
| Form | هيئة/ شكل |
| Pad | وسادة |
| Butt Joint | وصلة تقابلية |
| Propellant | وقود دافع |
| Insert | وليجة |
| Scintillator | ومّاض |
| Automate | يؤتمت |
| YAG: (Yttrium Aluminium Garnet) ($Y_3Al_5O_{12}$) | ياغ (إيتريوم ـ ألمنيوم ـ عقيق) |
| Sapphire | ياقوت أزرق |
| Focus | يبئّر/ تبئير/ يمحرق/ محرق |
| Process | يعالج/ سيرورة |

# ثبت المصطلحات: إنجليزي ـــ عربي

| | |
|---|---|
| Abalone | حيوان أذن البحر |
| Active | نشِط |
| Actuator | مفعِّل |
| Adsorption | امتزاز |
| Aerodynamic | ديناميك هوائي |
| Aerosol | هباب (معلّقات هوائية) |
| Agar | أغار (هلام الطحالب الحمراء) |
| Aging | تعتيق |
| Airframe | هيكل الطائرة أو الصاروخ (هيكل الجسم الطائر) |
| Aliphatic | أليفاتي |
| Allotropic | متغاير |
| Alloying | خلط |
| Amorphization | تزجُّج |
| Amorphous | لامتبلور |
| Anion | شاردة سالبة |
| Anisotropy | لاتناحي |
| Annealing | تطرية حرارية |
| Anode | مصعد |
| Anthropomorphic | بشري الشكل |
| Antiferromagnetism | مغنطيسية حديدية مضادة |

| | |
|---|---|
| Anvil | سندان |
| Arc | قوس (كهربائية) |
| Architecture | بنيان |
| Aromatic | عطري |
| Array | صفيفة |
| Aspect Ratio | نسبة بُعدية (نسبة الطول إلى العرض) |
| ASTM | منظمة مقاييس المواد واختباراتها الدولية (الأميركية) |
| Atomizing | تذرير |
| Austenite | أوستنيت |
| Autoclave | مِحَمّ |
| Automate | يؤتمت |
| Axisymmetric | تناظر أسطواني |
| Axonic | عصبوني |
| Ballistic | قذفي |
| Ballistic Protection | حماية من الطلقات النارية |
| Bar Code | رماز قضباني |
| Bearing | محمَل |
| Belt | سيْر |
| Bimetal | ثنائي المعدن |
| Bimorph | ثنائي الشكل |
| Binder Burnout | حرق (إزالة) الرابط |
| Biofluidics | سوائليات حيوية |
| Biomorph | بنية شبيهة بالأحياء |
| Bipolar Plate | صفيحة مزدوجة القطبية |
| Bit | بت (رقم اثناني)/ ريشة تثقيب |
| Blasting | سفع |

| | |
|---|---|
| Blisk (Bladed Disk) | قرص عنفة متكامل مع الشفرات |
| Block | لبِنة/ كتلة |
| Block Copolymer | بوليمر مشترك تعاقبي |
| Bolt | برغي/ مسمار |
| Bond | ربط |
| Boring | تجويف |
| Bottom Up | صعودي |
| Boundary | حدود |
| Braiding | جدْل |
| Brake | مكبح |
| Brazeing | لأم |
| Bucky Ball | كرة بَكِّي |
| Bucky Capsule | محفظة بَكِّي |
| Bucky Tube | أنبوب بَكِّي |
| Buffer | دارئ |
| Bulky | كتلي/ جَسِيم |
| Bump | نتوء/ وسادة/ انتفاخ |
| Burnout | حرق |
| Bushing | بطانة |
| Butt Joint | وصلة تقابلية |
| Calcination | تكليس |
| Caldding | تغطية/ إكساء |
| Caliper/ Calliper | كماشة |
| Calorimetry | قياس كمية الحرارة |
| Cantilever | عارضة بارزة |
| Capsule | محفظة |

| | |
|---|---|
| Carbohydrate | كربوهيدرات (سكريات ـ نشويات) |
| Carburizing | كربدة (تكوين الكربيدات) |
| Cast lron | حديد صب |
| Casting | صب |
| Catalyst | محفِّز |
| Cathode | مهبط |
| Cation | شاردة موجبة |
| Centipoise = $10^{-2}$ Poise | سنتيبواز |
| Cermet (CERamic-METal) | مادة سيراميكية معدنية |
| Char | فحم |
| Chip | رقاقة |
| Chiral | لاانطباقي |
| Cladding | إكساء/ تغليف/ تلبيس |
| Clamp | مقمط |
| Clay | صلصال/ غضار |
| Clearance | خلوص |
| Clutch | قابض |
| CMOL (CMos, MOLecule) | سيمول (سيموس ـ جزيء) |
| CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) | سيموس (نصف الناقل القائم على متمم أُكسيد المعدن) |
| Coagulated Slurry | معلّق متخثر |
| Coefficient | معامل |
| Coextrusion | بثق مشترك |
| Colinear | متسامت/ موازي |
| Colloidal Chemistry | كيمياء الغرويات |
| Compaction | رص |

| | |
|---|---|
| Complex | معقّد كيميائي |
| Compound | مركّب |
| Condensation | تكاثف |
| Confinement | حصر/ انحصار |
| Connector | مقبس |
| Convection (Thermal) | حَمل (حراري) |
| Conveyor Belt | سيْر النقل |
| Copolymer | بوليمر مشترك |
| Core Hardness | قساوة اللب |
| Coupling | قارنة |
| Crack | صدع/ تشقّق |
| Crankshaft | عمود المَرافق |
| Creep | زحف |
| Crevice | فتحة/ شق |
| Crimping | قمط تجعيدي |
| Cryogenic | شديد البرودة |
| Crystal | بلورة |
| Crystallite | بُلَيْرة |
| Cure | تصليد/ شي/ إنضاج |
| Damping | تخميد |
| Damping Capacity | مقدرة تخميدية |
| Debinding | إزالة الرابط |
| Decoding | فك الترميز |
| Deflashing | تشذيب |
| Degradative | هدَّام |
| Dehydrogenation | نزع الهيدروجين |

| | |
|---|---|
| Denature | تعديل الخواص الطبيعية |
| Dendrite | بنية شبه شجرية |
| Denier | دنير |
| Densification | تكثيف |
| Diamagnetism | مغنطيسية عكسية |
| Die | طبقة/ شريحة/ قالب/ لقمة قلوظة/ قلم خراطة |
| Diffraction | انعراج |
| Diffusion | تغلغل |
| Diffusivity | قابلية التغلغل |
| Dilutant | ممدِّد |
| Dilute Solution | محلول ممدد |
| Diode | ثنائي نصف ناقل |
| Dipping | تغطيس |
| Disclination | عيب تناظر دوراني |
| Dislocation | انفصام/ انزياح |
| Dispensability | قابلية التوزيع |
| Dispersant | مشتِّت |
| Dispersion | نثر/ منثور/ تشتيت |
| DNA | دنا (الحمض النووي الريبي المنقوص الأُكسجين) |
| Domino Effect | مفعول التداعي |
| Doping | إشابة |
| Drilling | تثقيب |
| Ductility | مطاوعة/ ليونة |
| Dusting out | اهتراء بالتغبُّر |
| Elastomer | مطّاط (مطّاطيات) |
| Electroactive Polymer | بوليمر مفعّل كهربائياً |

| | |
|---|---|
| Electrolyte | كهروليت |
| Electroplating | تلبيس كهربائي |
| Electrospinning | غزْل كهربائي |
| Electrostatic | كهروساكن |
| Endoscopic | تنظيري |
| Enthalpy | محتوى حراري |
| Epitaxy | تنمية بلّورية طبقية منتظمة على ركيزة متبلورة |
| Equiatomic | متساوي الذرّات |
| Equiaxed Crystals | بلّورات متساوية الأطوال المحورية |
| Equilibrium | توازن |
| Eutectic | أصهري (يوتكتي) |
| Excimer | ليزر فوق بنفسجي |
| Exciton | إكسيتون (إلكترون ـ ثقب) |
| Exfoliation | تقشُّر |
| Exotherm | ناشر للحرارة |
| Extrapolation | استقراء |
| Extrusion | بثق |
| Failure | إخفاق/ انهيار |
| Fatigue | تعب |
| Ferroelectricity | استقطاب كهربائي |
| Ferromagnetism | مغنطيسية حديدية |
| Fiber | ليف |
| Fibril | لُيَيْف: (ليف دقيق (قطره 1 نانومتر)) |
| Field Emission | إصدار حقلي |
| Filler | حشوة/ مالئ |
| Flame Retardant | معيق للهب |

| | |
|---|---|
| Flange | شفة |
| Flash Evaporation | تبخير جزئي |
| Flash Memory | ذاكرة ومضية |
| Flashes | زوائد |
| Flattening | تسطيح/ تسوية |
| Flip chip | رقاقة تلحم مباشرة على الدارة |
| Flowchart | مخطط انسيابي |
| Flow Porometry | قياس التدفّق المسامي |
| Fluid Bed | فرشة مسيّلة |
| Fluidics | سوائليات |
| Fluorescence | فَلْوَريّة/ تألق بالفَلْورة |
| Fluoropolymer | بوليمر فلوريني |
| Flux | صُهور/ سيالة |
| Focus | يبئِّر/ تبئير/ يمحرق/ محرق |
| Forging | تطريق |
| Form | هيئة/ شكل |
| Foundry | مَسْبكة (ورشة السباكة) |
| Fractal | فراكتال |
| Fracture | كسر |
| Frequency | تردّد |
| Friction Stir | تحريك احتكاكي |
| Fuel Cell | خلية وقود |
| Fullerenes | فُلَّرينات |
| Fuse | فاصمة حرارية |
| Fused Quartz | كوارتز مصهور (مادة غير متبلورة) |
| Fusion | اندماج/ دمج |

| | |
|---|---|
| Fuzzy Logic | منطق ترجيحي |
| Galling | اهتراء المعادن بالاحتكاك |
| Gasket | مانع تسرب |
| Gel | هلام |
| Gemstone | حجر كريم |
| Glaze | ميناء |
| Glazing | تزجيج |
| Grafting | تطعيم |
| Graphaitization | غرفتة |
| Grating | شبكة |
| Green Body | جسم طري |
| Greenhouse | بيت زجاجي |
| Grinding | جلخ/ طحن |
| Gripper | قبضة/ مقبض |
| Growth | تنمية |
| Gyration | تدويم |
| Hardness | قساوة |
| Hemodyalysis | غسيل الكلى |
| Hetero- | متباين |
| Heterocycle | حلقة مغايرة |
| Heterogeneous | متباين الخواص |
| High Polymer | بوليمر متقدّم |
| Hollow | أجوف |
| Homopolymer | بوليمر متجانس |
| Hopper | قمع تلقيم |
| HV (Vickers Hardness) | قساوة فيكرز |

| | |
|---|---|
| Hydrolysis | حلمهة |
| Hydrophilic | أليف للماء |
| Hydrophobic | نفور من الماء |
| Hydroxide | هيدروكسيد |
| Hysteresis | حلقة تباطؤ |
| Impregnation | تشريب |
| Inconel | اسم تجاري لسبيكة نيكل ـ كروم ـ حديد |
| Infiltration | تسريب |
| Infusion | تسريب/ نقع/ حقن |
| Ingot | سبيكة |
| Inhibitor | مثبط/ صاد |
| Injection | حقن |
| Insert | وليجة |
| In situ (in the Reaction Mixture) | محلي (ضمن مزيج التفاعل) |
| Interface | ملقى/ ملتقى |
| Intergranular | بين الحُبيْبات |
| Intermetallic | متعدّد المعادن |
| Interphase | طور بيني |
| Intragranular | ضمن الحُبيْبات |
| Ionomer | بوليمر شاردي |
| Irradiation | تشعيع |
| Isostatic | متوازن/ متساوي |
| Isothermal | متساوي الحرارة |
| Isotropic | متناحي |
| Jack | مقبس |
| Kevlar Fiber | ليف كفلار |

| | |
|---|---|
| Knitting | حياكة |
| Lamella | صفيحة |
| Lapping | صقل |
| Laproscopic | جراحي تنظيري |
| Latching Switches | مفاتيح قلابة |
| Leaching | استنزاف |
| Lean mixture | مزيج فقير بالوقود |
| LED (Light Emitting Diode) | ثنائي مشع للضوء |
| Liner | بطانة |
| Lubricant | مزلّق |
| Lubricity | قابلية التزليق |
| Luminescence | تألّق |
| Lyotropic | سوائلي التبلور |
| Macroscopic | جَسِيم/ جهري |
| Maglev (Magnetic Levitation) | سباحة مغنطيسية في الهواء |
| Magnetic Coercivity | شدة حقل إزالة المغنطة |
| Magnetostriction | تغيُّر الشكل مغنطيسياً |
| Malleable | مطاوع |
| Mandrel | قضيب/ عمود تشكيل |
| Martensite | مرتنزيت |
| Mass Production | إنتاج كمي |
| Matrix | حاضنة/ مصفوفة |
| Melt | صُهارة |
| Mesophase | طور وسطي |
| Metallurgy | تعدين/ علم المعادن |
| Metamaterial | مواد استثنائية الخصائص (فائقة) |

| | |
|---|---|
| Metastable | غير مستقر/ توازن حرج |
| Microprocessor | معالج صغري |
| Microscopic | مجهري/ ميكروي |
| Milling | تفريز/ طحن |
| Modular | نسيقي |
| Module | نسيقة |
| Modulus | معامل |
| Molding | قولبة |
| Monoclinic | أحادي الميل |
| Monolithic | جَسِيم |
| Monomer | مونومر |
| Mote | هباء |
| Mutant | متحوِّر |
| Nanoimprinting | سك نانوي |
| Nanoscopic | نانوي المقاس |
| Near Net Shape (NNS) | شكل شبه نهائي |
| Nematic | خطي (نيماتيك) |
| Neural Network | شبكة عصبونية |
| Nitinol | نيتينول |
| Nondestructive Examination | فحص لاإتلافي |
| Notched impact | خدش بالصدم |
| Nozzle | فوهة/ منفث |
| Nut | عزقة/ صمولة |
| Oligomer | أوليغومر |
| Optimization | استمثال |
| Order of magnitude | مرتبة كِبَر |

| | |
|---|---|
| Orthorhombic | متوازي المستطيلات/ موشور قائم بقاعدة مستطيلة |
| Osteolysis | ترقّق العظام |
| Outgassing | تخلية من الغازات/ طرد الغازات |
| Overhual | تعمير/ صيانة دورية |
| Oxidation | أكسدة |
| Pacemaker | منظم نبض القلب |
| Pad | وسادة |
| Paraelectric | قابل للاستقطاب كهربائياً |
| Paramagnetism | مغنطيسية مؤقتة (مسايرة) |
| Parameter | موسِط |
| Particle | جُسيْم |
| Particulate | هَباب/ جُسيْم منفصل |
| Passivation | تخميل |
| Peening | تقوية سطحية |
| Piezoceramic | سيراميك كهروضغطي |
| Penetrant | متغلغل |
| Percolation | تخلُّل |
| Permeability | نفاذية |
| Permeable | نَفوذ |
| Permittivity | سماحية |
| PH Steel (Precipitation Hardened Steel) | فولاذ مقسَّى بالترسيب |
| Phase Transformation | انتقال (تحول) طوري |
| Philic | أليف |
| Phobic | نفور |
| Phonon | فونون |
| Photodetector | كاشف ضوئي |

| | |
|---|---|
| Photoresist | متبلمر بالضوء |
| Piezoelectric | كهروضغطي |
| Pitch | زفت |
| Pixel | بكسل (عنصر صورة) |
| Planar | ثنائي الأبعاد (مستوي) |
| Plasmatron | بلازماترون |
| Plasmon | بلازمون |
| Plastic | لدائن |
| Plastic Flow | تدفّق لدن |
| Plasticity | لدانة |
| Plasticizer | ملدِّن |
| Plume | أسطوانة مائية |
| Pneumatic | هوائي/ غازي |
| Poise (1 P = 1 g $cm^{-1}$ $s^{-1}$) | بواز (واحدة اللزوجة) |
| Polymer | بوليمر (كثير الجُزَيئات) |
| Porosimertry | قياس المسامية |
| Powder | مسحوق |
| Powertrain | آلية توليد ونقل الحركة |
| Precipitation | ترسيب |
| Preform | خامة تشكيل |
| Preimpregnated | قبْلي التشريب |
| Prepolymer | بوليمر أولي |
| Prepreg Material | مادة تقوية أولية |
| Primary Battery | بطارية غير قابلة للشحن |
| Primer | طبقة تحضيرية/ تمهيدية لطلاء أو للاصق |
| Prion | برايون (شبه فيروس) |

| | |
|---|---|
| Process | يعالج/ سيرورة |
| Processing | معالجة |
| Progressive Oxidation | أكسدة متدرّجة |
| Propellant | وقود دافع |
| Proprietary | ملكية خاصة/ متخصِّص/ مخصَّص |
| Prosthesis | زرع الأعضاء |
| Pseudoplastic | شبه لدن |
| Pultrusion | بثق بالسحب |
| Pyrocarbon | كربون حراري |
| Pyrolysis | تفكيك حرارياً |
| Quantum | كمومي |
| Quantum Dot | نقطة كمومية |
| Quantum Well | بئر كمومية |
| Quenching | تبريد سريع (سقاية) |
| R phase | الطَورR |
| Rack | منصب |
| Radical | جذر |
| Random Access | نفاذ عشوائي |
| Ratchet | سقاطة |
| Rayon | حرير صناعي |
| Reactant | متفاعل |
| Reactive | تفاعلي/ قابل للتفاعل |
| Reactivity | استجابة (فعالية) |
| Rectification | تقويم |
| Recycling | تدوير |
| Reduction | إرجاع |

| | |
|---|---|
| Refractory | مقاوم للحرارة |
| Resistive Heating | تسخين المقاومة الكهربائي |
| Resolution | ميز (دقة الفصل) |
| Retort | إنبيق |
| Rheology | علم التدفق/ الريولوجيا |
| Rhombohedral | معيَّني |
| Ribosome | ريباسة |
| Rivet | برشامة (تبشيمة) |
| Rocker Covers | أغطية الصمّامات الهزازة |
| Rotor | قلب دوار |
| Rubbing | حك بالمسح |
| Runner System | مجرى الصب |
| Sacrificial | ذوَّاب/ مهدور |
| Sapphire | ياقوت أزرق |
| Scale | سلَّم |
| Scintillator | ومّاض |
| Scribing | خدش |
| Seal | مانع تسرب/ إطار إحكام |
| Sealing Ring | طوق إحكام |
| Seamless | عديم الوصلات |
| Sedimentaion | ترقيد |
| Seizing | اهتراء المعادن بالاحتكاك وبالتأكل بوجود الماء |
| Semiconductor | نصف ناقل/ شبه موصل |
| Sensor | مُحِس |
| Shaft | عمود/ قضيب/ محور |
| Shear | قص |

| | |
|---|---|
| Shear Thinning | ترقُّق ناجم عن القص |
| Shield | حجاب |
| Siboramic ($SiBN_3C$) | سيبورامي (سيراميك السليكون والبورون) |
| Sintering | تلبيد |
| Size | مقاس/ حجم |
| Slip | رداغ/ طين/ معلَّق |
| Slurry | معلّق (طينيّ القوام)/ ملاط |
| SMA: Shape Memory Alloy | ختش (خليطة تذكُّر الشكل) |
| Smectite | سمكتيتي |
| Smelting | صهر (استخراج المعدن من الخام) |
| Sol-Gel (Solution to Gel Conversion) | محلول ـ هلام (تحويل محلول إلى هلام) |
| Solid Solubility | قابلية ذوبان (انحلال) الحالة الصلبة |
| Solid State | حالة صلبة |
| Solvent | مذيب |
| Sonar | صوتي تحت مائي |
| Soot | سخام |
| Spacer | فاصل مسافة |
| Spallation | تشظي |
| Spark Plug | شمعة إشعال |
| Specie | جنس |
| Specific | نوعي |
| Spheroidization | تكوير |
| Spin | غزل/ تدويم |
| Spinodal | سبينودالي |
| Sputtering | ترذيذ |

| | |
|---|---|
| Stabilizer | موازن/ مثبّت |
| Stamping | دمغ |
| Standard | مِقيَس |
| Staple | خُرْزة |
| Stator | ساكن |
| Stem | أنبوب شبكي |
| Stent | شبكة أنبوبية |
| Stiction (Friction and Sticktion) | احتكاك التصاقي |
| Stiffness | جساءة |
| Stoichiometry | أمثال التفاعل الكيميائي |
| Strain | انفعال/ تشوُّه |
| Strength | مقاومة |
| Sublimation | تصعُّد |
| Submicron | دون ميكروي |
| Substrate | ركيزة |
| Superconductor | موصل/ ناقل فائق |
| Superelasticity | مرونة فائقة |
| Superplastic | فائق اللّدانة |
| Supersaturated | فائق التشبع |
| Supramolecule | جُزَيء ضخم |
| Surfactant | خافض التوتر السطحي/ عامل تبليل |
| Susceptor | صحن تسخين الركيزة |
| Swaging | تخصير |
| Switching | تبديل |
| Synchrotron | مسرع إلكترونات تزامني/ سينكروترون |
| Synergy | تضافر (طاقة العمل الجماعي) |

| | |
|---|---|
| Synthetic | تركيبي |
| Tag | لصيقة |
| Tap Density | كثافة المادة المرصوصة |
| Tapping | لولبة (فتح سن) |
| Tempering | تطبيع |
| Tenacity | متانة الليف أو الخيط (غرام ثقلي/ دِنير) |
| Tensile | شد |
| Tetragonal | رباعي الوجوه |
| Thermal Barrier | عازل حراري |
| Thermoelastic | حراري المرونة |
| Thermogravimetry | تحليل حراري وزني |
| Thermolysis | تحطيم حراري |
| Thermophoresis | تهجير حراري |
| Thermoplastic | حراري التلدّن |
| Thermoset | حراري التصلد |
| Thin Film | غشاء رقيق |
| Thixotropic | تميُّع بالرج/ تيكسوتروبي |
| Thrust | دفع |
| Tolerances | سماحيات |
| Tomography | تصوير مقطعي/ طبقي |
| Top Down | نزولي |
| Toughness | متانة |
| Tow | شلة، حزمة غير مجدولة من الألياف |
| Trackball | كرة الملاحقة |
| Transducer | محوال |
| Tribology | علم الاحتكاك والتزليق |

Triggering قَدْح

Tubule أنيبوب (أنبوب صغير)

Turbocharger ضاغط هواء محرّك الاحتراق الداخلي

Turning خراطة

Upright قائم

Valence تكافؤ

Van der Waals Attraction قوة فان در فالس

Vickers رز

Viscous Flow تدفّق لزج

Volatilization تطاير/ تبخر

w/w = Mass Percentage نسبة مئوية كتلية

Wafer شُراحة

Warp سَداة

Warp Interlocks متشابكات الأسدية

Washer فَلْكة (رنديلة)

Waveguide دليل موجة

Weave نسيج

Welding لحام

Wettability قابلية التبلّل

Whisker شعيرة

Wrought مقسًّى، مطرَّق

X-ray أشعّة سينية

X-ray Diffractometry قياس انعراج الأشعّة السينية

YAG: Yttrium Aluminium Garnet (Y3Al5O12) ياغ: إيتريوم ـ ألمنيوم ـ عقيق

Yield إنتاجية/ حصيلة/ طراوة/ مطاوعة/ خضوع

# الفهرس

- ج -



- ح -



- خ -



- د -

## - ر -


## - ز -


## - س -

## ـ ق ـ



## ـ ك ـ

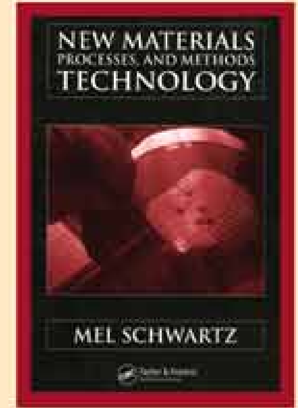


## ـ ل ـ

## - م -

# المـواد الـجديـدة

## تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها(*)




(*) الكتاب الثاني من المواد المتقدمة

**السلسلة:** تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

**الكتاب:** الكتاب دليل عملي لاختيار المواد واستخدامها بالمواصفات الصحيحة لتحقيق متطلبات التصميم والخدمة. ويشرح كيفية اتخاذ قرارات هندسية صائبة في تطوير وتصنيع المنتجات من المواد المتاحة. ويقدم وصفاً مفصلاً لأكثر طرائق التصنيع التطويري التصاقاً بالواقع العملي، دون أن يغفل المواد النانوية، والبلورات، والسيراميك، والأغشية الرقيقة، والنظم الإلكتروميكانيكية، وخلايا الوقود، والمواد المركبة الحيوية، وغيرها.

يعد الكتاب مرجعاً مهماً في علم المواد وتصنيعها لكل من الطالب والمتخصص على السواء.

**المؤلف:** **مِلْ شفارتز**: حاصل على إجازتين، في علم المعادن وإدارة الهندسة. خبير المعادن لدى هيئات أميركية متعددة. حصل على العديد من الجوائز وشهادات التقدير. ألَّف 16 كتاباً، وأكثر من 100 مقالة تقنية في حقل اختصاصه.

**المترجم:** **حاتم النجدي**: أستاذ في الجامعات السورية. متخصص بالإلكترونيات والاتصالات، ويهتم بالترجمة العلمية من الإنجليزية إلى العربية.

**سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة**

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

المنظمة العربية للترجمة

الثمن: 53 دولاراً أو ما يعادلها


ISBN 978-9953-0-2037-2
9 789953 020372

المواد الجديدة

تقاناتها وسيرورات معالجتها وطرائق تصنيعها

مِلْ شفارتز

(10 - 2)